

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MEDIANTE SOFTWARE LIBRE PYTHON PARA EL ANÁLISIS METALOGRAFICO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

FREDY RAFAEL LLULLUNA LLUMIQUINGA

fredy.llulluna@outlook.com

DIRECTOR: MSc. VÍCTOR HUGO HIDALGO DÍAZ

victor.hidalgo@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2014

DECLARACIÓN

Mi persona, Fredy Rafael Llulluna Llumiquinga, declaro bajo juramento que el presente trabajo es de mi autoría; y que no ha sido presentado para ninguna calificación profesional o proyecto de titulación. Todo lo consultado en el presente trabajo tiene su respectiva referencia bibliográfica y se encuentra incluida en el documento.

A través de la presente declaración, otorgo a la Escuela Politécnica Nacional los derechos de propiedad intelectual sobre el presente trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y normativa institucional vigente.

Fredy Rafael Llulluna Llumiquinga

CERTIFICACIÓN

Yo, Víctor Hugo Hidalgo Díaz, MSc. con colaboración del Ing. Carlos Díaz, MSc., dirigimos el proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico del señor FREDY RAFAEL LLULLUNA LLUMIQUINGA durante mi estadía en Ecuador como profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional y actualmente con permiso dado por la Escuela Politécnica Nacional por mi investigación Doctoral en la universidad de Tsinghua, Beijing - China.

Por tal razón certificamos que el presente proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico fue desarrollado por el señor FREDY RAFAEL LLULLUNA LLUMIQUINGA, bajo nuestra supervisión.



Ing. Hidalgo Díaz Víctor Hugo, MSc
DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Díaz Campoverde Carlos Wime, MSc
COLABORADOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

Con cariño inmenso y amor incondicional, la realización de esta obra va dedicada a mi familia y a una persona muy especial en vida y en mi corazón...

A mi madre, por ser el pilar más importante y la promotora de mi vida, quien me ha enseñado que con mucho esfuerzo y dedicación nada es imposible y que todo lo que nos propongamos lo podemos alcanzar. Por estar pendiente de mí día a día y por esos abrazos llenos de amor puro y sincero que me dan las fuerzas para seguir adelante, por ti mamita linda...

A mi hermanita Emily, siempre estaba ahí para alegrarme y alentarme los días difíciles.

A mi padre, que a pesar de la diferencias, me brindó su apoyo y aunque no siempre concordábamos, estuvo ahí.

Y de una manera muy especial, a mi novia quien siempre estuvo apoyándome y dándome la confianza para seguir adelante, quien llenó mi corazoncito de amor, alegría y felicidad. Por tu amor incondicional esta obra también te la dedico a ti mi Kary Elizabeth...

Fredy Rafael

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en todo momento por darme salud y vida para seguir adelante.

A mi padres Rafael y María por su apoyo incondicional, por todo el esfuerzo y dedicación que hicieron para que siga adelante.

A mi director de tesis Ing. Víctor Hugo Hidalgo y al Ing. Carlos Díaz por su ayuda incondicional y hacer que este proyecto sea posible.

A mi novia Karina Elizabeth por su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros de aulas con quienes pude compartir innumerables anécdotas en mi vida universitaria.

A la Escuela Politécnica Nacional y a la Facultad de Ingeniería Mecánica por todos los conocimientos adquiridos en la carrera.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 MATERIALES EN LA INGENIERÍA	2
1.3 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS METALES	3
1.3.1 CELDA UNITARIA	4
1.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RED CRISTALINA	4
1.3.3 NOCIONES FUNDAMENTALES SOBRE LAS ALEACIONES	10
1.4 ALEACIÓN METÁLICA	15
1.5 ALEACIONES DE HIERRO-CARBONO	15
1.5.1 ACEROS	15
1.5.2 FUNDICIONES	16
1.6 ACEROS AL CARBONO	17
1.6.1 ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO	18
1.6.2 FASES COMPONENTES DEL ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO	19
1.7 ANÁLISIS METALOGRÁFICO	24
1.8 OBTENCIÓN DE UNA MUESTRA METALOGRÁFICA	25
1.8.1 EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA	25
1.8.2 DESBASTE GRUESO	25
1.8.3 DESBASTE FINO	25
1.8.4 PULIDO GRUESO	26
1.8.5 PULIDO FINO	27
1.8.6 ATAQUE QUÍMICO	27
1.8.7 OBTENCIÓN DE LA MICROGRAFÍA	30

1.9 PROBETAS PARA EL ANÁLISIS METALOGRÁFICO	32
CAPÍTULO 2	33
MODELOS MATEMÁTICOS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	33
2.1 METALOGRAFÍA CUÁNTICA.....	33
2.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	33
2.2.1 IMAGEN Y PROCESAMIENTO DIGITAL	34
2.3 ETAPAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	35
2.3.1 CAPTURA DE IMAGEN.....	36
2.3.2 PREPROCESAMIENTO	36
2.3.3 SEGMENTACIÓN.....	37
2.3.4 EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS	37
2.3.5 IDENTIFICACIÓN DE OBJETOS	37
2.4 MÉTODOS ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO SEGÚN NORMA ASTM E-122.....	38
2.4.1 PROCEDIMIENTO DE COMPARACIÓN.....	38
2.4.2 PROCEDIMIENTO PLANIMÉTRICO	39
2.4.3 PROCEDIMIENTO DE INTERSECCIÓN.....	40
2.5 DETERMINACIÓN DE TAMAÑOS DE GRANO EN ACEROS MEDIANTE LA NORMA ESPAÑOLA UNE 7-280-72.....	42
2.5.1 TAMAÑO DE GRANO.....	42
2.5.2 ÍNDICE G.....	42
2.5.3 MÉTODO DE VALORACIÓN POR RECUENTO DIRECTO	43
2.6 ALTERNATIVAS DE LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	44
2.6.1 ALTERNATIVA A: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN <i>JAVA</i>	45
2.6.2 ALTERNATIVA B: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN <i>PYTHON</i>	46
2.6.3 ALTERNATIVA C: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN <i>C++</i>	48
2.6.4 ALTERNATIVA D: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN <i>VISUAL BASIC</i>	50

2.7 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.....	52
CAPÍTULO 3	53
DESARROLLO DEL SOFTWARE.....	53
3.1 CÓDIGO FUENTE	53
3.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON APLICADO A PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	54
3.2.1 PAQUETES O LIBRERÍAS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	54
3.3 CÓDIGO PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DE GRANO.....	56
3.4 INTERFAZ GRÁFICA DEL PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MEDIANTE SOFTWARE LIBRE PYTHON PARA EL ANÁLISIS METALOGRÁFICO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO	60
3.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA	60
CAPÍTULO 4	61
FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE	61
4.1 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA.....	61
4.2 FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE PAX-it	63
4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBTENCIÓN DE ERRORES.....	67
4.4 ANÁLISIS DE VARIANZA	68
4.4.1 VARIANZA DENTRO DE GRUPOS.....	68
4.4.2 LA VARIANZA ENTRE GRUPOS	68
4.4.3 DETECCIÓN DE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS.....	68
4.4.4 MODELO MATEMÁTICO.....	69
4.4.5 CUADRADOS MEDIOS.....	69
4.4.6 HIPÓTESIS DE ANOVA	69

4.4.7 TABLA DE ANOVA (DISPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS).....	70
4.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIANZA	71
4.5.1 TABLA ANOVA PARA PORCENTAJE DE FERRITA	73
4.5.2 TABLA ANOVA PARA PORCENTAJE DE PERLITA	74
4.5.3 TABLA ANOVA PARA TAMAÑO DE GRANO	76
4.5.4 TABLA FINAL DE RESULTADOS	78
CAPÍTULO 5	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
5.1 CONCLUSIONES.....	79
5.2 RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	85
ANEXO 1.....	86
REDES CRISTALINAS EXISTENTES ANEXO 2.....	86
ANEXO 2.....	87
SOLUCIONES PARA REALIZAR EL ATAQUE QUÍMICO	87
ANEXO 3.....	89
PLANTILLA COMPARATIVA PARA DETERMINAR TAMAÑO DE GRANO PARA PROCEDIMIENTO DE COMPARACIÓN NORMA ASTM E-122.	89
ANEXO 4.....	90
PLANTILLA DE 175 MM DE DIÁMETRO EXTERIOR PARA PROCEDIMIENTO PLANIMÉTRICO NORMA ASTM E-122.	90
ANEXO 5.....	91
PLANTILLA PARA MÉTODO DE INTERSECCIÓN NORMA ASTM E-112.....	91

ANEXO 6.....	92
ANEXO 7.....	93
TABLA III, VALORES DE ÍNDICES DE TAMAÑO DE GRANO G.....	93
ANEXO 8.....	94
CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de estructuras cristalinas	5
Figura 1.2 Esquema para cálculo de parámetro a (red cristalina BCC.)	5
Figura 1.3 Esquema para cálculo de parámetro a (red cristalina FCC).....	7
Figura 1.4 Red cúbica centrada en el cuerpo.....	8
Figura 1.5 Red cúbica centrada en la caras.....	8
Figura 1.6 Red Hexagonal compacta	9
Figura 1.7 Red tetragonal centrada en el cuerpo	9
Figura 1.8 Esquema de muestra mecánica.....	11
Figura 1.9 Red cristalina de un compuesto químico.....	12
Figura 1.10 Esquema de una solución sólida.....	12
Figura 1.11 Solución sólida por sustitución	13
Figura 1.12 Solución sólida intersticial	14
Figura 1.13 Clasificación de aleaciones Hierro-Carbono	15
Figura 1.14 Clasificación de los Aceros	18
Figura 1.15 Diagrama hierro- carbono	20
Figura 1.16 Microestructura de la ferrita.....	21
Figura 1.17 Microestructura perlítica	22
Figura 1.18 Evolución y crecimiento de la bainita superior e inferior.....	23
Figura 1.19 Microestructura ferrítico-perlítica.....	24
Figura 1.20 Máquina desbastadora.....	25
Figura 1.21 Máquina para desbaste fino	26
Figura 1.22 Pulidora de paño	26
Figura 1.23 Forma esquemática de cómo se va eliminando las superficies deformadas hasta llegar a la superficie real.....	27
Figura 1.24 Ataque químico (inmersión de la probeta en el reactivo).	28
Figura 1.25 Uso de aire caliente para eliminar exceso de agua en la probeta	29
Figura 1.26 Probetas listas para realizar la toma de micrografía respectiva	29
Figura 1.27 Ajuste de microscopio metalográfico del laboratorio.	30
Figura 1.28 Obtención de micrografía con aumento 100x.....	31
Figura 2.1 Digitalización de un objeto	34
Figura 2.2 Descomposición de un objeto en una matriz MxN	35

Figura 2.3 Etapas para procesamiento digital de imágenes.....	36
Figura 2.4 Métodos para la determinación del tamaño de grano	38
Figura 2.5 Plantilla comparativa para determinar tamaño de grano	39
Figura 2.6 Plantilla para método planimétrico.	40
Figura 2.7 Plantilla para método de intersección (Norma ASTM E-112).....	41
Figura 2.8 Recuento convencional del número de granos observados.....	43
Figura 3.1 Ejemplos de directorio librería matplotlib.....	55
Figura 4.1 Interfaz gráfica de Software “Procesamiento de imágenes”.....	62
Figura 4.2 Resultados gráficos del software elaborado.....	63
Figura 4.3 Interfaz gráfica de Software PAX-it	64
Figura 4.4 Selección de método de cálculo de tamaño de grano.....	65
Figura 4.5 Tamaño de grano determinado	65
Figura 4.6 Porcentaje de ferrita y perlita	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Números de coordinación de estructuras cristalinas	4
Tabla 1.2 Número de átomos en cada celda unitaria	5
Tabla 1.3 Soluciones típicas para ataque químico en aceros	28
Tabla 1.4 Probetas utilizadas para el análisis metalográfico	32
Tabla 2.5 Factor de corrección para determinar tamaño de grano.....	39
Tabla 2.6 Criterios de selección	44
Tabla 2.7 Evaluación cualitativa y cuantitativa de la alternativa A.....	46
Tabla 2.8 Evaluación cualitativa y cuantitativa Alternativa	48
Tabla 2.9 Criterios de selección Alternativa	49
Tabla 2.10 Criterios de selección	51
Tabla 2.11 Selección de la alternativa para elaboración de software.....	52
Tabla 2.12 Resultados	52
Tabla 4.13 Resultados de software de Procesamiento de imágenes.....	62
Tabla 4.14 Resultados del software PAX-it	66
Tabla 4.15 Comparación de tamaño de grano con software PAX-it.....	67
Tabla 4.16 Comparación de mezcla de fases (ferrita, perlita)	67
Tabla 4.17 Datos de porcentaje de ferrita	72
Tabla 4.18 Datos de porcentaje de perlita.....	72
Tabla 4.19 Datos de tamaño de grano	72
Tabla 4.20 ANOVA para porcentaje de ferrita	73
Tabla 4.21 ANOVA para porcentaje de ferrita	74
Tabla 4.22 ANOVA para porcentaje de perlita	75
Tabla 4.23 ANOVA para Porcentaje de perlita	75
Tabla 4.24 ANOVA Para tamaño de grano	76
Tabla 4.25 ANOVA para Tamaño de grano.....	77
Tabla 4.26 Verificación de hipótesis planteadas	78

RESUMEN

La metalografía es un área de gran importancia en la ingeniería mecánica y más aún en el campo de los materiales, porque se puede predecir el comportamiento, usos, aplicaciones, ventajas y desventajas de los mismos, acorde al tipo de trabajo al que van a estar sometidos, y sollicitaciones mecánicas requeridas.

El presente trabajo tiene la finalidad de reducir el tiempo de análisis metalográfico a través de la elaboración de un software de procesamiento de imágenes (en las micrografías) escrito en lenguaje de programación python, el mismo que tiene varias ventajas como son; una gran capacidad de respuesta en el procesamiento, análisis de imágenes de manera rápida y efectiva, y ofrece una interfaz gráfica amigable con el usuario; presenta facilidad de acceso al código fuente para realizar cualquier cambio e integrar mejoras al programa. A futuro puede implementar nuevos alcances, con metodologías más eficientes y procesos que optimicen el tiempo de análisis, mayor confiabilidad en los resultados, que abarquen toda la gama aceros, aleaciones metalúrgicas y materiales utilizados en la vida diaria y en la industria, con proyección a convertirse en el instrumento más utilizado en la industria metalúrgica; por su facilidad de uso y portabilidad.

PRESENTACIÓN

En la Ingeniería Mecánica el Análisis Metalográfico es de gran importancia porque permite determinar la microestructura del material, tamaño de grano y la determinación de sus fases componentes, y de esta manera se puede predecir el comportamiento y las propiedades de los metales.

Existen diferentes métodos para la determinación del tamaño de grano; todos están estandarizados según normas ASTM, pero estos métodos tienen su respectivo procedimiento y tiempo de determinación. Con el "Software de Procesamiento de Imágenes" lo que se pretende es reducir el tiempo de análisis y determinación del tamaño de grano y porcentajes de fases en aceros de bajo contenido de carbono. Las ventajas que tenemos al usar software libre son que sus licencias nos permiten instalar tantas veces y en cuantas máquinas se desee; además podemos acceder al código fuente y así desarrollar nuevos productos sin necesidad de realizar todo el proceso partiendo desde cero. El software estará enfocado como una ayuda didáctica para agilizar el análisis metalográfico a estudiantes, y posteriormente, ampliar su uso a la industria metalúrgica.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El mundo moderno de la alta tecnología no habría existido de no ser por el desarrollo del computador y la informática, herramientas esenciales en todos los campos de la investigación y la tecnología, con aplicaciones que van desde la elaboración de modelos del universo, previsiones meteorológicas, telecomunicaciones y hasta procesos asistidos por computador. La informática es la ciencia que se encarga del tratamiento automático de la información. El hombre ha desarrollado esta ciencia con el objetivo de potenciar sus capacidades de pensamiento, memoria y comunicación. Esta disciplina reúne varias técnicas y conocimientos científicos que hacen posible el procesamiento automático de la información por medio de ordenadores, dispositivos electrónicos y sistemas computacionales.

La informática es aplicada en varios y diversos sectores de la actividad humana como la medicina, bioquímica, física, astronomía, ingeniería, industria, investigación científica, gestión empresarial, etc. En la actualidad, presenta un enorme abanico de procesos y soluciones que cubren desde las más simples tareas hogareñas hasta los más complejos cálculos científicos. La ingeniería mecánica es una tecnología de gran expansión, gracias a la introducción de elementos informáticos y de herramientas de análisis experimental. Así, es posible diseñar nuevos productos más optimizados respecto a sus funciones, costos de producción y explotación.

La microscopía es una herramienta, muy importante para el estudio de materiales, más aún en las aleaciones metálicas. Las técnicas de microscopía electrónica han evolucionado a formas muy sofisticadas y esenciales para el estudio de la

metalurgia, como: estructuras de solidificación, transformaciones de fase, estructuras de grano, superficies de fractura, entre otros. ^[1]

El análisis metalográfico (análisis microestructural) es una herramienta muy útil en la ingeniería de los materiales porque permite determinar las características estructurales, el tamaño de grano, forma de la red cristalina, distribución de fases componentes e inclusiones que tienen efecto sobre las propiedades mecánicas de los metales. Este análisis nos permite predecir el comportamiento de los materiales en diferentes condiciones de servicio. Como no siempre se dispone de un centro o laboratorio con técnicos especialistas y equipos sofisticados para la caracterización de materiales, ya sea para la selección de materiales o para un análisis de control de calidad, la imagen digital presenta varias ventajas por sus múltiples posibilidades de manipulación; las imágenes pueden ser procesadas para obtener información, para medir el tamaño de grano, forma, estructura y determinación de fases componentes, lo cual está al alcance de una correcta preparación de la muestra y de la ayuda de un ordenador complementado con un software de procesamiento de imágenes aplicado a la metalografía.

1.2 MATERIALES EN LA INGENIERÍA

Los materiales son elementos principales en todas las ramas de la ingeniería. Al efectuar un trabajo, el ingeniero tiene una gran cantidad de materiales existentes de los cuales puede escoger. Para elegir el mejor material hay que tomar en cuenta ciertos factores, como la aplicabilidad del material, las propiedades mecánicas requeridas, el tipo y costo de fabricación. Los materiales usados en el campo de la ingeniería se presentan en diferentes formas y su clasificación obedece a varias consideraciones como la estructura atómica, composición química, número de componentes y sus aplicaciones.

Clasificación de los materiales

- ❖ Metales y aleaciones
- ❖ Polímeros
- ❖ Cerámicos

- ❖ Semiconductores
- ❖ Compuestos

En la Ingeniería Mecánica los materiales comúnmente utilizados son los metales y sus aleaciones debido a sus características y propiedades mecánicas, por su buena conductividad eléctrica y térmica, una resistencia relativamente alta, rigidez elevada, ductilidad o conformabilidad, resistencia al impacto y costo beneficio. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se utilizan metales puros, las combinaciones de metales conocidas como aleaciones proporcionan mejoría en alguna propiedad particularmente deseable o permiten una mejor combinación de propiedades. [2]

1.3 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS METALES

Los metales como todos los elementos químicos están formados por átomos de diferente radio atómico. Los tamaños de los átomos se miden en unidades de Angstrom, (Angstrom es igual a 10^{-8} centímetros). En la metalurgia es importante tener presente los tamaños relativos (de los átomos) de los componentes de una aleación. En materiales en estado líquido, los átomos que se encuentran en movimiento no guardan posiciones fijas. Cuando los materiales en estado líquido solidifican el movimiento atómico se detiene y, según sea su naturaleza, los materiales pueden ser amorfos o cristalinos. En estado sólido los átomos tienen un orden y posición definida, en tal caso se dice que tiene una estructura cristalina, es decir forman cristales. Pero, ciertos materiales no presentan una posición definida al solidificar y su estructura es desordenada, estos materiales son conocidos como materiales amorfos, ejemplo el vidrio.

Los metales son elementos cristalinos cuyos átomos están dispuestos en el espacio ocupando un orden geométrico determinado y formando una red cristalina o red espacial la cual está constituida por celdillas iguales. La menor de las celdillas se denomina Celda Unitaria.

1.3.1 CELDA UNITARIA

Una celda unitaria es el menor conjunto de átomos que conservan las mismas propiedades geométricas de la red y que al repetirse muchas veces en el espacio forman la red cristalina. Los sólidos cristalinos pueden optar por alguna forma de las 14 redes cristalinas o “*redes de Bravais*” existentes (ver anexo 1). La mayoría de los metales y sus aleaciones presentan cuatro estructuras: Red cúbica centrada en el cuerpo (BCC), red cúbica centrada en las caras (FCC), red hexagonal compacta (HCP) y red tetragonal centrada en el cuerpo.

1.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA RED CRISTALINA

1.3.2.1 Índice de coordinación

Es el número de átomos que se encuentran más próximos y equidistantes de un átomo dado, como se detalla en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Números de coordinación de estructuras cristalinas^[3]

Estructura	BCC	FCC	HCP
Número de Coordinación	8	12	12

1.3.2.2 Densidad de compactación

Es el volumen que pueden ocupar los átomos dentro de la red cristalina; considerando que cada átomo es de forma esférica se puede calcular el valor en volumen mediante la ecuación 1.1.

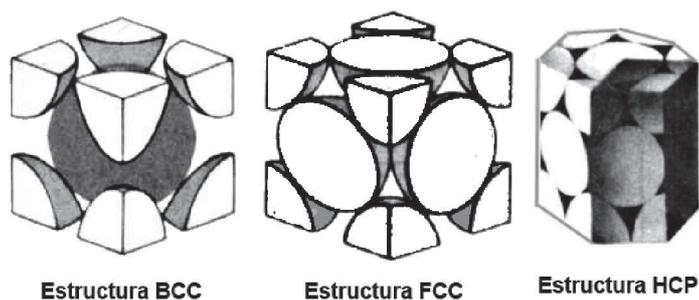
$$\text{Densidad de compactación} = \frac{V_{\text{real ocupado}}}{V_{\text{cristal}}} \quad (1.1)$$

1.3.2.3 Átomos correspondientes a la celda unitaria

Es el número de átomos enteros que corresponden a una celda unitaria, este número de átomos depende del tipo de estructura cristalina, red cúbica centrada en el cuerpo BCC, red cúbica centrada en la cara FCC y hexagonal compacta HCP, como se ilustra en la figura 1.1 y en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Número de átomos en cada celda unitaria

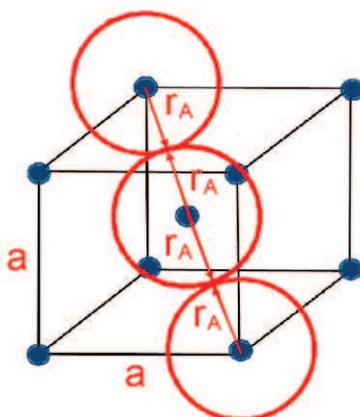
Estructura Cristalina	Numero de átomos
BCC	2
FCC	4
HCP	6

Figura 1.1 Esquema de estructuras cristalinas ^[3]

1.3.2.4 Parámetros de red

Es la distancia entre estructuras cristalinas. Los parámetros de la red (a , b , c) se caracterizan por sus dimensiones en Angstroms. Para el caso de la estructura cúbica centrada el parámetro de red se calcula de la siguiente forma:

Se traza una diagonal al cubo en donde se encuentran los tres átomos en contacto tangencial como se indica en la figura 1.2, esto para la red cristalina BCC.

Figura 1.2 Esquema para cálculo de parámetro a (red cristalina BCC.)

Donde el parámetro a se calcula a través de la diagonal del cubo, ecuación 1.2.

$$D = 4 \cdot r_A = a \cdot \sqrt{3}$$

$$a = 4 \cdot r_A / (\sqrt{3}) \quad (1.2)$$

Volumen real del cubo o volumen del cristal, ecuación 1.3.

$$V_{\text{cristal}} = a^3 = \left(\frac{4 \cdot r_A}{\sqrt{3}} \right)^3 \quad (1.3)$$

Como cada átomo de los vértices se encuentra compartido por ocho celdas, un octavo de cada vértice se encuentra en el interior de cada celda más un átomo central.

$$\text{N}^\circ \text{ de átomos propios} = \frac{1}{8} (\# \text{ de vértices}) + 1 \text{ at. central} \quad (1.4)$$

$$\text{N}^\circ \text{ de átomos propios} = \frac{1}{8} (8) + 1$$

$$\text{N}^\circ \text{ de átomos propios} = 2$$

Número de átomos propios de la red BCC \rightarrow 2 átomos por celda

La densidad de compactación se define como el volumen real ocupado por los átomos (considerados esferas rígidas) y el volumen del cristal. El volumen real ocupado por los átomos es el volumen de 1 átomo multiplicado por el número de átomos en el interior de la celda unitaria, ecuación 1.5.

$$V_{\text{real ocupado}} = V_{\text{átomo}} \cdot \# \text{ at. interiores} \quad (1.5)$$

$$V_{\text{real ocupado}} = (2) \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_A^3$$

De manera que la densidad de compactación o factor de empaquetamiento se indica en la ecuación 1.6.

$$\text{Densidad de compactación} = \frac{V_{\text{real ocupado}}}{V_{\text{cristal}}} = \frac{(2) \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_A^3}{\left(\frac{4^3 \cdot r_A^3}{\sqrt{3}^3} \right)} = \frac{8\pi/3}{64/3\sqrt{3}} = 0.68 \quad (1.6)$$

Densidad de compactación = **68 %**

Este mismo proceso se utiliza para la red cúbica centrada en las caras.

Donde el número de átomos propios de la celda:

$$\text{N}^\circ \text{ de átomos propios} = \frac{1}{8} (\# \text{ de vértices}) + \frac{1}{2} (\# \text{ de caras})$$

$$\text{N}^\circ \text{ de átomos propios} = \frac{1}{8} (8) + \frac{1}{2} (6)$$

$$\text{N}^\circ \text{ de átomos propios} = 4$$

Para la densidad de compactación se utiliza la figura 1.3.

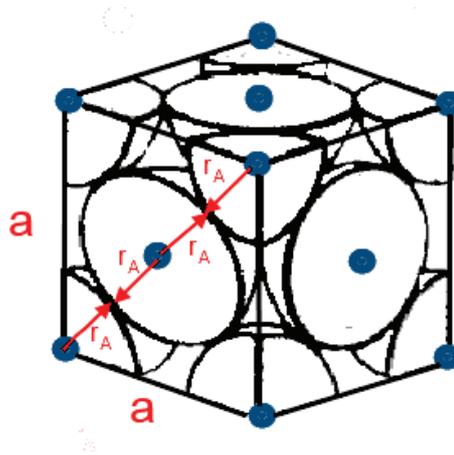


Figura 1.3 Esquema para cálculo de parámetro a (red cristalina FCC)

La diagonal de la red cristalina es:

$$D = 4 \cdot r_A; \quad D = a\sqrt{2}$$

$$a = 4 \cdot r_A / (\sqrt{2})$$

$$V_{\text{cristal}} = a^3 = \left(\frac{4 \cdot r_A}{\sqrt{2}} \right)^3 = \frac{64 \cdot r_A^3}{2\sqrt{2}}$$

$$V_{\text{real acupado}} = (4) \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_A^3$$

$$\text{Densidad de compactación} = \frac{V_{\text{real acupado}}}{V_{\text{cristal}}} = \frac{(4) \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_A^3}{\frac{64 \cdot r_A^3}{2\sqrt{2}}} = \frac{\pi/3}{4/2\sqrt{2}} = 0.74$$

$$\text{Densidad de compactación} = 74\%$$

1.3.2.5 Red cúbica centrada en el cuerpo (BCC)

La red cristalina se representa por un cubo cuyo parámetro es a , sus átomos están dispuestos en los vértices y en el centro del cubo, como se muestra en la figura 1.4. La densidad de compactación de la red es de 68% es decir sus átomos ocupan cierta parte del volumen de la red unitaria. Su número de coordinación es 8, los materiales que presentan esta estructura cristalina son: Hierro (Fe), Sodio (Na), Molibdeno (Mo), etc.

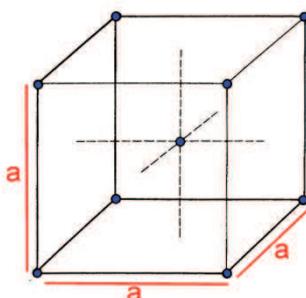


Figura 1.4 Red cúbica centrada en el cuerpo

1.3.2.6 Red cúbica centrada en las caras (FCC)

La red presenta un cubo cuyo parámetro de red es a , dispuestos con ocho átomos presentes en los vértices del cubo y seis átomos en cada una de las caras, como se indica en la figura 1.5. Su densidad de compactación es de 74% y el índice de coordinación es 12. Ejemplos: Cobre (Cu), Aluminio (Al), Titanio (Ti), etc.

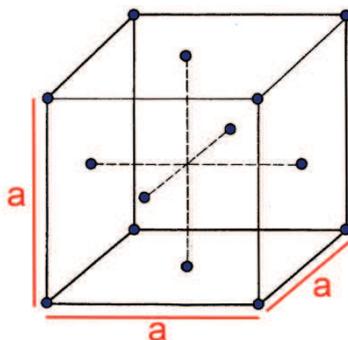


Figura 1.5 Red cúbica centrada en la caras

1.3.2.7 Red hexagonal compacta (HCP)

La forma de su red es un prisma recto cuya base es un hexaedro, a diferencia de las anteriores redes cristalinas, esta da lugar a dos parámetros, los lados de la

base del prisma son a y su altura c , como se indica en la figura 1.6. En sus vértices de red están dispuestos doce átomos, en el centro de la base dos átomos y en el interior de la red tres átomos. Sus átomos ocupan el 74% del volumen de la red y el índice de coordinación es 12. Ejemplos: Magnesio (Mg), Cadmio (Cd), etc.

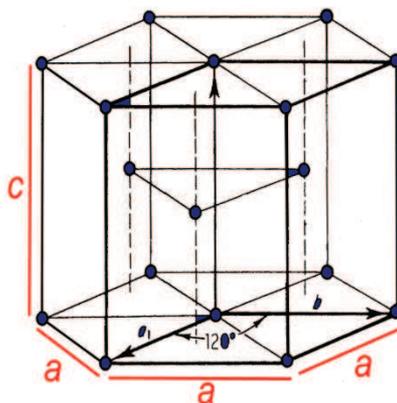


Figura 1.6 Red Hexagonal compacta

1.3.2.8 Red tetragonal centrada en el cuerpo

Tiene la forma de un prisma recto de base centrada, sus átomos están dispuestos de la misma forma que la red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) con la diferencia de que presenta dos parámetros, el lado de la base a y la altura c , la relación entre los dos parámetros c/a recibe el nombre de grado de tetragonalidad y presenta un índice de coordinación de 8, figura 1.7.

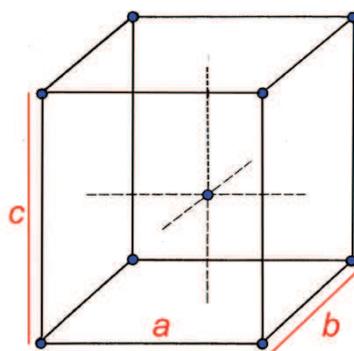


Figura 1.7 Red tetragonal centrada en el cuerpo

1.3.3 NOCIONES FUNDAMENTALES SOBRE LAS ALEACIONES

Una aleación es una sustancia obtenida por la fusión de dos o más elementos. Un sistema de aleación contiene todas las aleaciones posibles y pueden formarse varios elementos combinados. Si el sistema se forma por dos elementos se llama *sistema de aleación binaria*; si se forma por tres elementos se denomina *sistema de aleación ternaria*; etc. Si se toman sólo 45 de los metales más comunes, cualquier combinación de los metales dará 990 sistemas binarios, con combinaciones de tres metales se obtendrán más de 14000 sistemas ternarios; sin embargo, para cada sistema es posible contar con un gran número de aleaciones diferentes. Si la composición varía en 1%, cada sistema binario dará 100 clases de aleaciones diferentes. ^[4]

La estructura de una aleación metálica es más compleja que la de un metal puro y depende de las interacciones entre los componentes de la aleación. En estado sólido no puede existir interacción química entre componentes (sustancias simples) que la forman, la estructura que forma esta aleación es una *mezcla mecánica*. Si las sustancias pueden reaccionar químicamente y formar compuesto, o disolverse en otra formando soluciones. ^[5]

1.3.3.1 Mezclas mecánicas

Formada por dos componentes que no reaccionan químicamente y son incapaces de disolverse en estado sólido. En esta condición, la aleación está formada por cristales A y B que se distinguen claramente en la microestructura, como se muestra en la figura 1.8. El análisis metalográfico mostrará la existencia de las dos fases de los componentes A y B. Si a esta aleación se analiza por separado, las propiedades de los cristales A y de los cristales B serán idénticas a los metales puros A y B. Las propiedades mecánicas dependen de la relación cuantitativa entre los componentes y del tamaño y forma de los granos, siendo sus valores intermedios entre las propiedades características de los componentes puros.

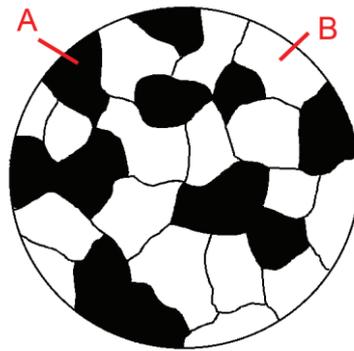


Figura 1.8 Esquema de muestra mecánica

1.3.3.2 *Combinación química*

En los compuestos químicos hay que considerar que factores, como la relación entre el número de átomos de cada elemento, coincida con la proporción estequiométrica que expresa la fórmula $AnBm$. Los átomos componentes de la red cristalina formada están ordenados de manera regular. La combinación química se caracteriza por tener una determinada temperatura de fusión y por variar las propiedades cuando varía la composición. Cuando un compuesto químico se forma con elementos metálicos, en los nodos de las redes se encontrarán los iones con carga positiva retenidos por el enlace metálico. El enlace metálico no es rígido y en determinadas condiciones la cantidad de un elemento, puede ser mayor o menor al que corresponde a la relación estequiométrica, por esta razón los compuestos químicos formados con átomos metálicos no cumplen con la ley de valencia.

Al formarse el compuesto químico de un metal y un no metal, aparece el enlace iónico; la interacción entre los elementos hace que los átomos metálicos cedan electrones de valencia convirtiéndose así en iones positivos, y los átomos del no metal aceptan los electrones incorporándolos a su capa exterior transformándose en iones negativos. La red de un compuesto formada por este tipo de elementos es retenida por atracción electrostática. En estos compuestos, el enlace es rígido, como se indica en la figura 1.9, de manera que corresponde exactamente a la relación estequiométrica, es decir, no puede tener exceso ni falta de átomos de cualquiera de los elementos que forman el compuesto químico.

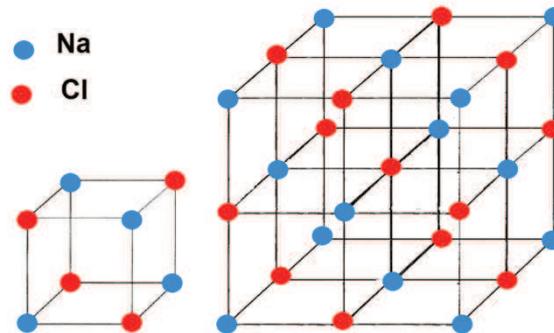


Figura 1.9 Red cristalina de un compuesto químico

1.3.3.3 Solución sólida

En estado líquido la mayoría de las aleaciones metálicas que se utilizan en la práctica son líquidos homogéneos o soluciones líquidas, al pasar al estado sólido, las aleaciones conservan la homogeneidad y por consiguiente la solubilidad. La fase o solución sólida se forma como resultado de la cristalización de una aleación. El análisis químico muestra que en las soluciones sólidas existen dos o más elementos, mientras que el análisis metalográfico indica que la solución presenta granos homogéneos, es decir, un sólo tipo de red cristalina, al igual que un metal puro como se observa en la figura 1.10. La solución sólida tiene una única fase y está constituida por un tipo de cristales y posee una sólo red cristalina. No existe una relación determinada entre sus componentes, pero sí en un intervalo de concentraciones.

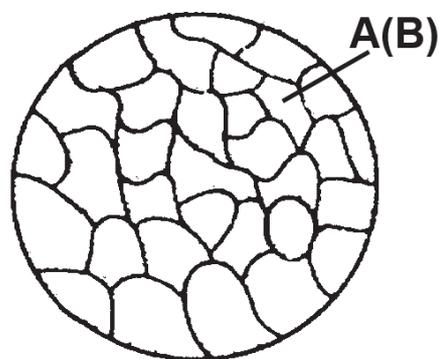


Figura 1.10 Esquema de una solución sólida

En la solución sólida se presenta el solvente y el soluto. El solvente es uno de los componentes que conserva su propia red cristalina, mientras que el soluto, en forma de átomos, se distribuye en la red cristalina del primer componente. Las soluciones sólidas pueden ser por sustitución e intersticiales. Independientemente del tipo de solución, las soluciones sólidas son monofásicas.

1.3.3.4 Solución sólida por sustitución

En este tipo de solución el elemento A mantiene su red cristalina y el elemento B se disuelve en el metal A, este proceso se efectúa por sustitución de los átomos del metal A por los del B en la red del metal básico como se indica en la figura 1.11.

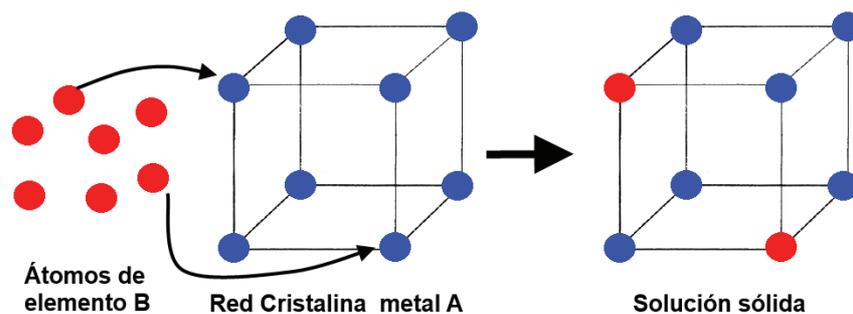


Figura 1.11 Solución sólida por sustitución

Las soluciones sólidas por sustitución pueden ser limitadas o ilimitadas. De manera que cuando la solución es total cualquier cantidad de átomos del metal A puede ser sustituida por los átomos del metal o elemento B. Las condiciones para realizar una solución sólida por sustitución son:

- Las redes cristalinas del soluto como del solvente deben ser similares.
- Los átomos del soluto y de solvente difieren en su diámetros máximo al 15%.
- En igualdad de condiciones es muy probable que el metal de menor valencia disuelva al de mayor valencia.
- Los elementos deben tener naturaleza electroquímica similar (cercanas a la tabla periódica).

1.3.3.5 Solución sólida intersticial

En este caso los átomos del soluto se sitúan en los intersticios (espacios vacíos dentro de una red cristalina) de la red cristalina del disolvente, como se muestra en la figura 1.12. Como los átomos del soluto deben insertarse en la red del disolvente se deben cumplir las siguientes condiciones:

- El elemento disolvente es polivalente.
- Las sustancias están cercanas entre sí en la tabla periódica.
- El diámetro del átomo del soluto no es mayor al 59% del diámetro del átomo de disolvente. Ejemplo, carbono, nitrógeno, hidrogeno, etc.

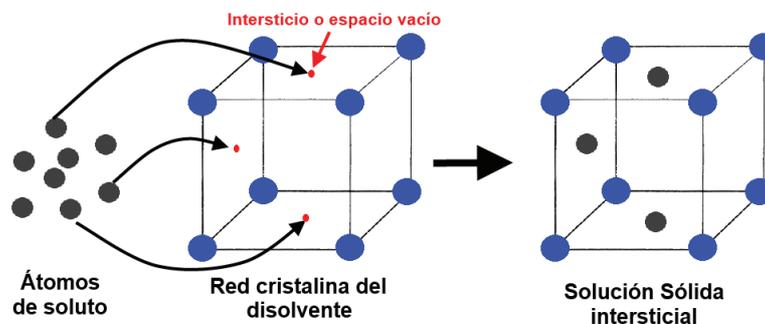


Figura 1.12 Solución sólida intersticial

En este tipo de soluciones, como en los líquidos, puede mantenerse más soluto en una solución sólida en altas temperaturas, pero el soluto es más propenso a precipitarse al bajar la temperatura. Cada temperatura tiene su propia cantidad de saturación, el soluto se precipita a partir del disolvente sólido, con frecuencia se forma un compuesto químico intermetálico con el disolvente o solvente. Dichos compuestos tienen estructuras de red definidas que por lo general son frágiles.

1.3.3.6 Fase en una aleación

Una aleación puede presentar una o más fases a su composición de elementos aleantes. Una fase se define como una porción de materia que es química y estructuralmente homogénea. No puede subdividirse por medios mecánicos o distinguirse en partes más pequeñas con un microscopio óptico ordinario, por ejemplo, el hierro fundido presenta una fase al igual que el cobre sólido puro.

1.4 ALEACIÓN METÁLICA

Una aleación metálica es una sustancia que se obtiene por medio de fusión de dos o más componentes de los cuales uno debe ser un elemento metálico. Presenta una estructura diferente a la de un metal puro y depende de las interacciones entre los componentes que intervienen en la aleación. Las diferentes combinaciones de los elementos componentes que se encuentran en la mayoría de aleaciones metálicas pueden ser clasificadas como soluciones sólidas, mezclas mecánicas y compuestos químicos.

1.5 ALEACIONES DE HIERRO-CARBONO

Las aleaciones de hierro y carbono son las aleaciones metálicas más importantes de la industria metalúrgica. Según su contenido de carbono se dividen en aceros y fundiciones de hierro. Hay que tomar en cuenta que el carbono influye en las propiedades de la aleación proporcionando propiedades particulares al material.

Las aleaciones hierro-carbono se clasifican en aceros y fundiciones como se ilustra en figura 1.13.

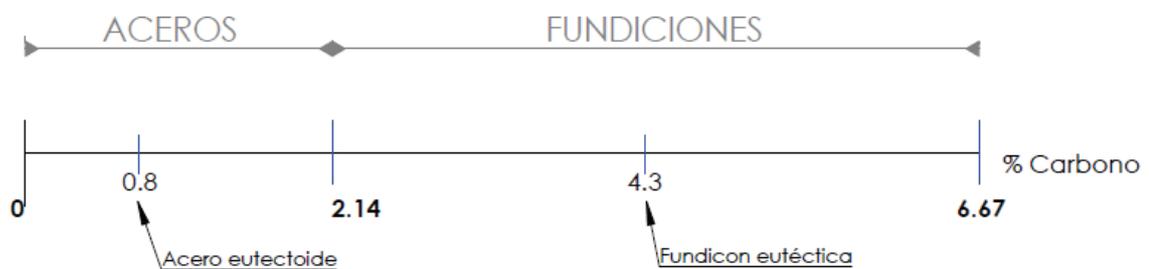


Figura 1.13 Clasificación de aleaciones Hierro-Carbono

1.5.1 ACEROS

Se denomina acero a las aleaciones de hierro-carbono en las que el contenido de carbono no supera el 2,14%. Los aceros que contienen menor al 0,8% de carbono se denominan aleaciones hipoeutectoides; con 0,8% de C, eutectoides, y con un porcentaje mayor al 0,8% de C, hipereutectoides. El carbono tiene una gran influencia en las propiedades del acero, incluso cuando su contenido varía en modo insignificante. Los aceros de bajo contenido de carbono tienen hasta un

0.25% aproximadamente de este elemento, las propiedades que presentan son: ductilidad y maleabilidad, no responden de manera apreciable al calentamiento, tampoco al tratamiento térmico, pero son muy utilizados para trabajos en frío. Las aplicaciones típicas de los aceros de bajo contenido de carbono son en piezas de carrocerías, chasis de automóviles, para elaborar recipientes, estructuras metálicas y piezas labradas a máquina, todas ellas requieren gran ductilidad y facilidad para ser soldados.

Los aceros de medio contenido de carbono presentan concentraciones desde 0.25 a 0.60% de carbono. Son muy utilizados para el endurecimiento, de manera que estos aceros pueden ser tratados térmicamente para mejorar sus propiedades. Este tipo de aceros son muy utilizados en vías y ruedas de ferrocarril, cigüeñales, varillas de conexiones, etc.

Los aceros de alto contenido de carbono poseen más del 0.6% de carbono hasta un 0.95 %; son menos dúctiles, pero más resistentes, también son los que mejor responden al tratamiento térmico, y no son de fácil soldabilidad. Por lo general, esta aleación se utiliza templada con el objetivo de desarrollar mejor su combinación de dureza, resistencia, tenacidad y ductilidad. Son muy utilizados en la industria agrícola, para herramientas de corte, alambres de alta resistencia a la tensión, resorte, herramientas y dados de extrusión, etc.

1.5.2 FUNDICIONES

Se denominan fundiciones de hierro a las aleaciones de hierro-carbono cuyo contenido de carbono es superior al 2,14% de C e inferior a 6,67% de C. Las fundiciones de hierro que contienen menos de 4,3% de C, reciben el nombre hipoeutécticas; con 4,3% de C, es una fundición eutéctica, y con más de 4,3% y menos de 6,67% de C, hipereutécticas como se indica en la figura 1.13. ^[6]

Las fundiciones se clasifican por su estructura (no por el contenido de carbono), de manera que las fundiciones en cuya estructura se presenta hierro-cementita se conocen como fundiciones blancas, a temperatura ambiente es eutéctica (se

forma a 1147% C) a un 4.3% de carbono (a esta estructura se conoce como ledeburita).

La fundición gris se obtiene cuando la aleación en estado líquido se deja enfriar añadiéndole carbono o silicio que actúan como agentes grafítizantes (se enfría lentamente). En este tipo de aleación, el grafito se presenta como grandes láminas sobre una matriz que puede ser ferrítica o perlítica o combinación de las dos. El grafito es una fase blanda en relación a su resistencia mecánica, actúa como si fueran grietas internas las cuales provocan un gran aumento de la tendencia a la fragilidad. La fragilidad disminuye cuando las partículas de grafito son redondas. Para conseguirlo, durante la solidificación se añade magnesio (Mg) o cerio (Cr) y posteriormente, las partículas de grafito aparecen en forma de nódulos. A esta formación se denomina fundición nodular.

Las fundiciones nodulares se presentan a muy alta temperatura y durante mucho tiempo, la cementita se transforma en grafito como estructura de equilibrio. En cambio, la fundición gris presenta una menor tendencia a la rotura por fragilidad y por tanto, tiene menor resistencia a la tracción.

1.6 ACEROS AL CARBONO

Los aceros al carbono son aleaciones de hierro y carbono que presentan concentraciones apreciables de otros elementos aleantes. En la actualidad, existen miles de aceros que tienen distintas composiciones y/o tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas dependen del contenido de carbono que es inferior al 2,14% de carbono. En cada grupo existen subclases de acuerdo con la concentración de otros elementos de aleación. ^[6]

En el presente trabajo se hace énfasis al análisis en aceros de bajo contenido de carbono como se indica en la figura 1.14.



Figura 1.14 Clasificación de los Aceros

1.6.1 ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO

La mayor parte de todo el acero fabricado es bajo en carbono. Este tipo de acero contiene menos del 0,25% C, no responde a tratamiento térmico para formar martensita y es endurecible por deformación en frío, al efectuar la deformación plástica del metal en frío, los granos se deforman y fragmentan, ello aumenta la dureza del metal, reduce su plasticidad y provoca fragilidad. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad; son de fácil mecanizado, soldables y baratos. Se utilizan para fabricar carrocerías de automóviles, vigas (en forma de I, canales y ángulos) y láminas para construir tuberías, vigas para edificios, puentes y latas estañadas. Estos aceros suelen tener un límite elástico de 275 MPa, una resistencia a la tracción comprendida entre 415 y 550 MPa y una ductilidad del 25%.

Otro grupo de aceros bajos en carbono está constituido por los aceros de **alta resistencia y baja aleación (HSLA)** que contienen elementos de aleación como cobre, vanadio, níquel y molibdeno en concentraciones combinadas de aproximadamente el 10% en peso y poseen mayor resistencia mecánica que los aceros bajos en carbono. Se aumenta la resistencia por tratamiento térmico y el límite elástico excede de 480 MPa; además son dúctiles y mecanizables. En el ambiente, los aceros HSLA son más resistente a la corrosión que los aceros al carbono, a los que se suelen reemplazar en muchas aplicaciones donde la

resistencia mecánica es crítica: puentes, torres, columnas de soporte de altos edificios y recipientes de presión. [6]

1.6.2 FASES COMPONENTES DEL ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO

Para los aceros usados comúnmente en la industria, como los aceros de bajo contenido de carbono o estructurales, las fases producidas a partir de la austenita como la ferrita, perlita, bainita y martensita dependen del tipo de enfriamiento aplicado a la aleación y el porcentaje de carbono en ella. La austenita presenta una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) que es más compacta que la cúbica centrada en el cuerpo (BCC) como se muestra en la figura 1.15. El parámetro que determina la descomposición de la austenita es la energía libre del sistema, que se ve reducida al pasar de la estructura FCC propia de la austenita, a la BCC, propia de la ferrita. Esta energía libre depende de la temperatura, al ir descendiendo favorece la descomposición de la austenita en ferrita. Existe una temperatura de estabilización de cada una de las fases a partir de la cual, la energía libre de estas es menor a la de la austenita.

En el caso de las transformaciones de fase que se dan sin tensiones aplicadas, se observa un incremento en el volumen debido a la diferencia entre las estructuras cristalinas de la fase inicial y la final. El primer paso que se da en las transformaciones de fase es la nucleación de pequeñas partículas o núcleos; las regiones más favorables para la nucleación son las imperfecciones, como bordes de grano, vacantes y dislocaciones.

El segundo paso es el crecimiento del núcleo hasta convertirse en un nuevo grano. Se distinguen dos tipos de transformaciones la difusiva (o reconstructiva) y no difusiva.

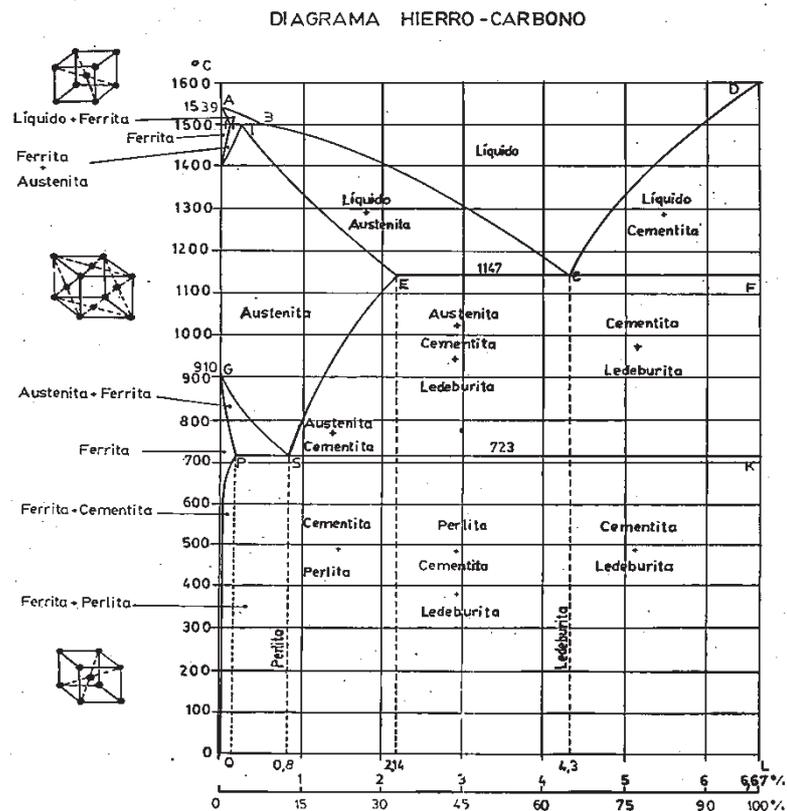


Figura 1.15 Diagrama hierro- carbono [5]

En las transformaciones difusivas, los átomos tienen la suficiente movilidad para desplazarse a través de la intercara de transformación reordenando la estructura cristalina, mientras que en las no difusivas los átomos no tienen la suficiente movilidad. La transformación difusiva requiere cierto tiempo, mientras que la no difusiva, puede darse muy rápidamente. El tipo y la cinética de la transformación dependerá tanto del enfriamiento como de la composición química y del tamaño de grano austenítico del material.

1.6.2.1 Austenita

La austenita es una solución sólida de carbono en hierro gama (hierro con estructura FCC existente en el intervalo de 911° a 1392°C) sólo estable a altas temperaturas. El porcentaje de carbono soluble en esta fase depende de los elementos aleantes del acero. La propiedad más importante es su gran plasticidad, por lo que se trabaja fácilmente (forja, estampación, etc.)

1.6.2.2 *Ferrita*

Es la primera fase que se obtiene durante el enfriamiento de la austenita; puede disolver muy pequeñas cantidades de carbono (0.008% a temperatura ambiente). La ferrita es una solución sólida intersticial, los átomos de carbono se disponen en los intersticios de la red de hierro, de manera que la ferrita es blanda, poco resistente, dúctil y magnética (pierde esta última propiedad a una temperatura superior a 768°C) y su microestructura es igual a la que muestra en la figura 1.16.

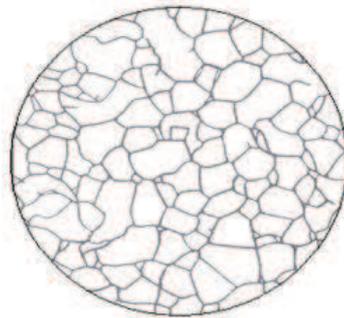


Figura 1.16 Microestructura de la ferrita ^[12]

Su estructura cristalina es cúbica de cuerpo, la solubilidad máxima de carbono en la ferrita es aproximadamente de 0,008% de C a 20°C y de 0,03% de C a 723°C, presenta una dureza de 80-100 HB y resistencia a la tracción $R_t = 32 \text{Kg/mm}^2$.

La ferrita alotriomórfica es la que primero realiza la nucleación (a 910°C en hierro puro, pero puede bajar hasta 710°C en acero con 0,77% de C). La nucleación en los bordes de grano de la austenita crece mediante un proceso de reconstrucción que implica la reorganización de todos los átomos. La ferrita idiomórfica, que se forma mediante los mismos mecanismos que la alotriomórfica, nuclea en inclusiones u otros lugares de nucleación heterogéneos; esta tiene una estructura externa muy equiaxial, es decir, no existe ninguna dimensión que prevalezca sobre las demás.

1.6.2.3 *Perlita*

Esta fase es un constituyente importante de la mayoría de los aceros comerciales debido a sus versátiles características mecánicas. La perlita es una mezcla mecánica (eutectoide, es decir, semejante a la eutéctica, pero formada desde una

fase sólida) formado por 86.5% de ferrita y 13.5% de cementita como se muestra en la figura 1.17. Generalmente, se presenta en forma laminar con la ferrita interpenetrada y cristales de cementita que crecen cara a cara mediante un proceso difusivo normalmente en los bordes de grano austeníticos.

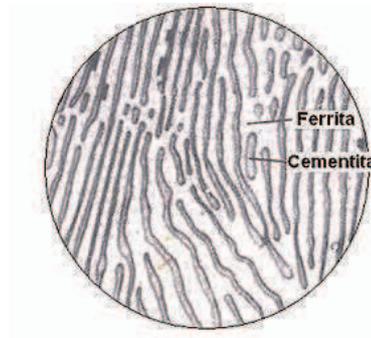


Figura 1.17 Microestructura perlítica

La velocidad de crecimiento de la nueva perlita viene determinada sobre todo por la difusión del carbono. La velocidad de difusión del carbono, la distancia de difusión y el espacio interlaminar final vienen definidos por la temperatura a la cual se da la transformación y la velocidad de enfriamiento. El espacio interlaminar es el parámetro principal que caracteriza las propiedades mecánicas de la perlita y el que clasifica las diferentes clases. Cuando el espacio interlaminar es pequeño y las láminas son muy delgadas se conoce como perlita fina, mientras que las estructuras con un mayor espacio interlaminar y láminas más gruesas se conocen como perlita gruesa. Las propiedades mecánicas estarán entre las de la cementita, dura y frágil, y las de la ferrita, más blanda y dúctil; por lo que a medida que aumenta el porcentaje de cementita, la perlita se vuelve más dura y más frágil. La perlita fina es más dura y menos dúctil que la perlita gruesa. ^[4]

1.6.2.4 *Bainita*

La bainita es también una estructura de ferrita y cementita como la perlita, pero con una morfología diferente. Es visible únicamente a través del microscopio electrónico, ya que consiste en láminas muy finas de ferrita que se agrupan en fases. La nucleación empieza en los bordes de grano austeníticos y la transformación es inicialmente no difusiva, pero inmediatamente después de la

primera transformación, el carbono empieza a difundir hacia la austenita remanente, y puede nuclear un nuevo grupo de placas bainíticas en la punta de las ya formadas. A medida que la austenita se va enriqueciendo en carbono la transformación se va frenando hasta que finalmente se detiene. Existen dos tipos de bainita, la bainita superior y la inferior. En la bainita superior, una parte del carbono que ha sido expulsado de la ferrita bainítica enriquece la austenita y se precipita en forma de cementita. Esto es aún posible ya que la bainita crece a temperaturas en las que la difusión del carbono es aún más rápida que la precipitación de carburos. La bainita inferior aparece a más bajas temperaturas en donde la movilidad del carbono se reduce, una parte de la ferrita sobresaturada no puede ser extraída, y se precipita en forma de finos carburos dentro de las placas de ferrita. El resto de carbono al que le ha sido posible difundir a la austenita, aún se precipita como carburo entre las placas. Esto da a la perlita inferior su morfología tan característica, véase figura 1.18.



Figura 1.18 Evolución y crecimiento de la bainita superior e inferior ^[7]

Los aceros bainíticos son más duros y resistentes que los aceros perlíticos porque tienen una estructura muy fina a base de partículas diminutas de Fe_3C (carburo de hierro) en la matriz ferrítica; por esta razón combinan resistencia y ductilidad.

1.6.2.5 Aceros ferríticos-perlíticos

Los aceros tienen una matriz ferrítico-perlítica como se muestra en la figura 1.19, ofrecen propiedades mecánicas superiores a las de sus fases componentes por separados, buen acabado superficial, alta resistencia a la tracción y al desgaste, ductilidad y maleabilidad (por presencia de la ferrita). Además posee una óptima templabilidad lo que hace que sea una buena elección para aplicaciones en componentes que exijan una alta resistencia al desgaste y a tratamientos térmicos superficiales.

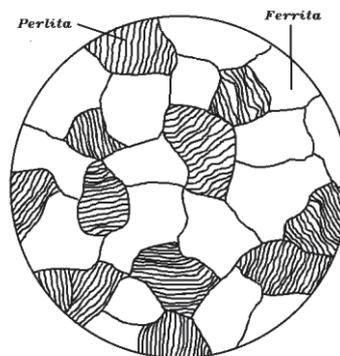


Figura 1.19 Microestructura ferrítico-perlítica

1.7 ANÁLISIS METALOGRÁFICO

El objetivo principal del análisis metalográfico es revelar la estructura de los metales y sus aleaciones por medio de un microscopio electrónico de barrido óptico o de luz en varios niveles de magnificación que pueden ir desde 20x hasta 1'000.000x. La metalografía estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o una aleación y la relación que existe con sus propiedades físicas, mecánicas y sus efectos térmicos. Con la preparación de una muestra metalográfica y la evaluación de su microestructura, es posible determinar el tamaño de grano, distribución de fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revela también si el material recibió un tratamiento mecánico o térmico y bajo un conjunto de condiciones dadas, se puede predecir su comportamiento mecánico. El éxito del análisis metalográfico depende del cuidado que se haya tenido en la preparación de la probeta.

1.8 OBTENCIÓN DE UNA MUESTRA METALGRÁFICA

1.8.1 EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA

La muestra o probeta debe ser seleccionada adecuadamente considerando que ésta debe ser la más representativa para realizar el análisis. Las probetas deben tener un tamaño conveniente y proporcionar una fácil manipulación. Las probetas de manejo adecuadas son aquellas que poseen una altura mínima de 12 mm y la dimensión de una de las direcciones de la superficie a pulir debe ser 20 mm². Durante el corte, la muestra debe mantenerse fría para evitar transformaciones estructurales.

1.8.2 DESBASTE GRUESO

En esta operación se hace uso de una máquina desbastadora de disco ilustrada en la figura 1.20, la cual está provista de una lija número 80 (80 granos por pulgada lineal). En esta operación se remueven rebabas y todas la rayaduras originadas por el corte, esto se logra presionando uniformemente la probeta sobre la desbastadora de disco. Durante esta operación se debe mantener fría la probeta mediante un flujo continuo de agua.



Figura 1.20 Máquina desbastadora

1.8.3 DESBASTE FINO

El propósito de esta etapa es remover la zona deformada causada por los dos procesos anteriores. Esto se hace mediante una selección adecuada y secuencial de abrasivos o lijas (lijas números: 240, 320, 400 y 600 granos/pulgada lineal) y el uso de la máquina de desbaste fino como se muestra en la figura 1.21 y con

pequeñas cantidades de agua en circulación en todo el proceso de pulido. Sin embargo, cuando una zona de deformación está siendo removida, se formará una nueva zona de menor deformación, no tan severa ni profunda como la inicial, ocasionada por la acción de los granos abrasivos utilizados en esta etapa. Para eliminar esta nueva deformación se tiene que girar la probeta 90° y realizar la misma operación varias veces, este proceso se lo realiza con cada uno de los abrasivos.



Figura 1.21 Máquina para desbaste fino

1.8.4 PULIDO GRUESO

Es una operación de desbaste leve, esta etapa es la más importante y crítica de toda la operación de pulido, ya que en esta etapa se eliminarán las deformaciones más profundas y más cercanas a la microestructura real de la muestra metalográfica. Se emplea la pulidora de paño, ilustrada en la figura 1.22, utilizando como abrasivo (alúmina de 1 micrón en suspensión en agua).



Figura 1.22 Pulidora

1.8.5 PULIDO FINO

Una vez concluido el pulido grueso, las deformaciones que se presentan son mucho más pequeñas, estas deformaciones serán eliminadas en este proceso para posteriormente visualizar la estructura real que tiene la muestra, esta operación se ejecuta utilizando un abrasivo (alúmina de 0.3 micrón de tamaño promedio en suspensión en agua). En la figura 1.23 se observa el proceso de eliminación de superficies deformadas hasta llegar a la microestructura final.

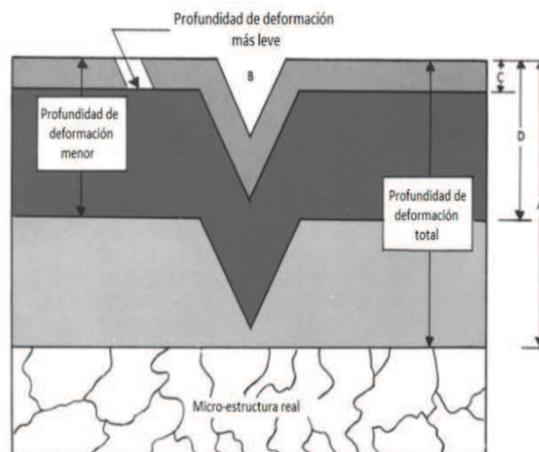


Figura 1.23 Forma esquemática de cómo se van eliminando las superficies deformadas hasta llegar a la superficie real [3]

1.8.6 ATAQUE QUÍMICO

Luego del pulido fino, la superficie es tratada químicamente. El ataque químico es un proceso de corrosión controlado que se produce sobre la muestra, reaccionando químicamente sobre sus componentes (ferrita, perlita), revelando los límites o bordes de grano presentes en la muestra, se consigue sumergiendo la superficie en algún tipo adecuado de solución o reactivo. La solución química usada depende del tipo de material que compone la muestra, la temperatura, tiempo del ataque y el efecto deseado en la superficie. En el anexo 2 se muestran algunas soluciones para realizar el ataque químico.

Adicionalmente, para las aleaciones ferrosas se utilizan dos químicos comunes para el acabado final de las muestras acorde con la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Soluciones típicas para ataque químico en aceros

SOLUCIÓN	COMPOSICIÓN	EFEECTO
Pical	Ácido pícrico 4 g Alcohol etílico 100 ml	Revela límites de grano de austenita en estructuras martensíticas , ferrita y perlita
Nital 2%	Ácido nítrico 2 ml Alcohol etílico 110 ml	Realza la interfase entre carburos y en la matriz de ferrita-perlita

El objetivo del ataque químico es hacer visible al microscopio las características estructurales del metal o aleación mediante el uso adecuado del reactivo. Para la selección de un reactivo adecuado se toma en cuenta el tipo de material y su estructura a observar, comúnmente para aceros de bajo contenido de carbono se hace uso de ácido nítrico en diferentes concentraciones.

Las operaciones utilizadas para realizar el ataque químico son:

- Ataque químico por inmersión de la probeta en el reactivo.
- Ataque químico mediante algodón empapado con reactivo, que se frota sobre la superficie pulida con la ayuda de una pinza.

En este caso se utiliza ácido nítrico de 2% en concentración, mediante el ataque químico por inmersión como se muestra en la figura 1.24.



Figura 1.24 Ataque químico (inmersión de la probeta en el reactivo)

Una vez realizada la inmersión en el reactivo por unos instantes, se limpia la superficie que estuvo en contacto con el reactivo, frotando suavemente con algodón y abundante agua, con ello se deshace del exceso del mismo.

A continuación, se elimina el exceso de agua de la probeta utilizando un flujo de aire caliente proveniente de la secadora del laboratorio.



Figura 1.25 Uso de aire caliente para eliminar exceso de agua en la probeta.

Una vez realizado el proceso de ataque químico sobre la muestra metalográfica, se deja secar la probeta por unos instantes como indica figura 1.26, quedando ya lista para realizar la captura de las micrografías respectivas, mediante el microscopio metalográfico del laboratorio.

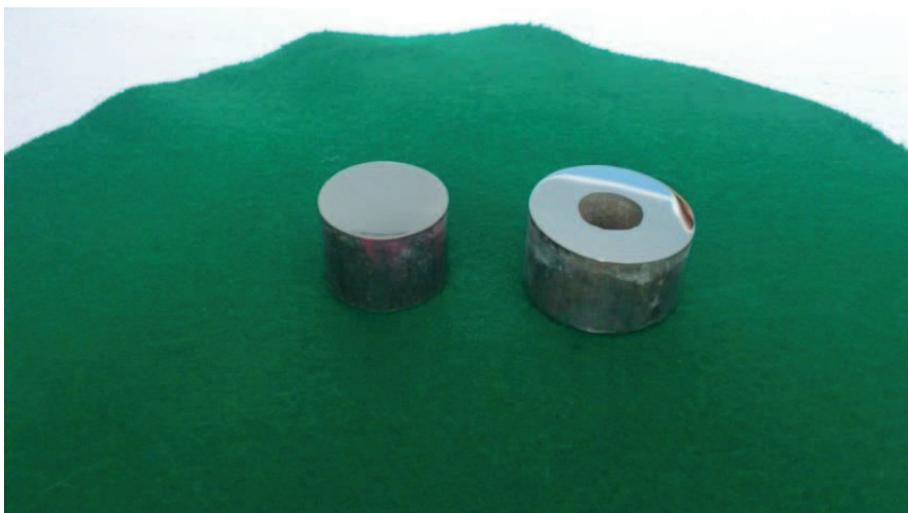


Figura 1.26 Probetas listas para realizar la toma de micrografía respectiva

1.8.7 OBTENCIÓN DE LA MICROGRAFÍA

Finalizada la etapa de procedimiento metalográfico, se ajusta el microscopio mostrado en la figura 1.27, para realizar una óptima captura de imagen o micrografía, para esto, la superficie (expuesta) de la muestra debe estar totalmente pulida y sin ningún tipo de imperfecciones que interfieran en la visualización de la estructura de la micrografía, para ello la imagen debe tener magnificación estándar de aumentos (100x) y un enfoque adecuado que brinde nitidez a la imagen capturada por el microscopio.



Figura 1.27 Ajuste de microscopio metalográfico del laboratorio.

La imagen obtenida tiene una dimensión de 2048x1536 pixeles en cada probeta a una magnificación de 100x, se realiza el análisis metalográfico haciendo uso del programa de procesamiento de imágenes para la determinación del tamaño de

grano y porcentaje de fases ferrítico-perlíticas en aceros de bajo contenido de carbono.

Hay que tomar en cuenta que el software está diseñado para analizar imágenes con formatos JPEG (.jpg), debido a que el microscopio metalográfico del laboratorio está programado para exportar imágenes en este tipo de formato. Por lo que no es necesario realizar ningún cambio en la imagen, tal y como ocurre con el software metalográfico del laboratorio PAX-it (programa de análisis metalográfico con licencia) que pertenece al laboratorio. Una vez realizada la captura respectiva, ésta va directamente al software para su posterior análisis.

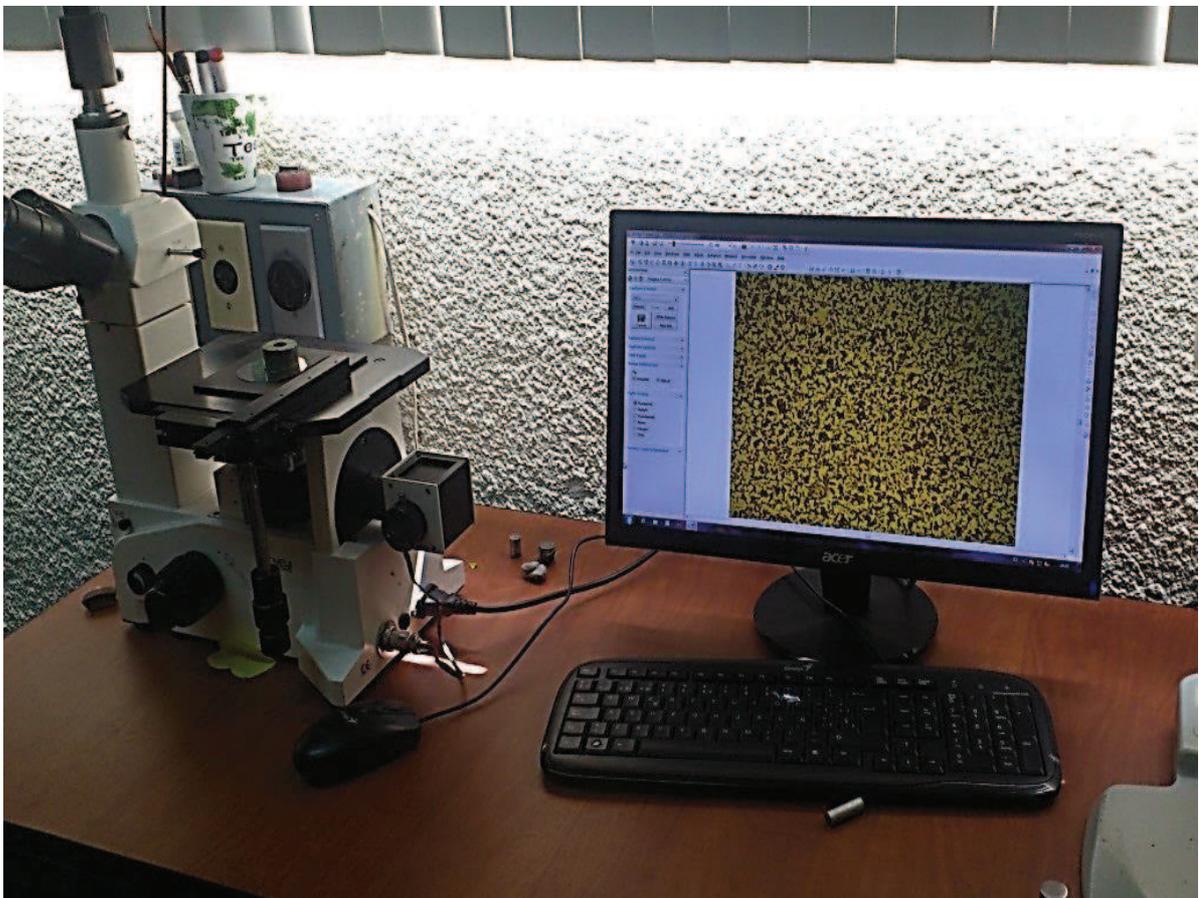


Figura 1.28 Obtención de micrografía con aumento 100x

1.9 PROBETAS PARA EL ANÁLISIS METALGRÁFICO

Se utilizan cuatro tipos de acero para el análisis propuesto, los mismos que tienen bajos contenidos de carbono (menor al 0,25%) como se observa en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Probetas utilizadas para el análisis metalográfico.

N. de probeta	Tipo de acero	% de Carbono	Esquema
1	AISI - 7210 SAE - 8620	0,15	
2	Mecaplus E- 470	0,18	
3	ASTM A-36 (Varilla estructural)	0,15 -0,25	
4	SAE - 1018	0,15 – 0,20	

CAPÍTULO 2

MODELOS MATEMÁTICOS Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

2.1 METALOGRAFÍA CUÁNTICA

La metalografía cuantitativa es una técnica de muestreo utilizada para cuantificar aspectos considerados importantes en las imágenes obtenidas mediante microscopía óptica o microscopía de barrido. La metalografía cuantitativa fundamenta sus procedimientos en la Estereología, ciencia que permite analizar, de manera efectiva, la forma tridimensional de los sólidos a partir de la información obtenida con secciones bidimensionales o secciones planas de los mismos. Dicha ciencia no busca reconstruir un objeto tridimensional en su totalidad, sólo unas pocas secciones o muestras del material en el estudio, aplicando sobre ella técnicas simples de estimación no paramétrica (parámetros geométricos) como el volumen y el área. La estimación es válida sólo en la teoría clásica de muestreo estadístico, de manera que los métodos estereológicos son suposiciones libres y por tanto, son aplicables en diferentes ciencias como la biología y las ciencias de los materiales.

2.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El procesamiento digital de imágenes es una disciplina que se ha desarrollado desde la década de los sesenta, inicialmente por la NASA, buscando aplicar algoritmos sobre una imagen para reconocer datos implícitos, lo cual permite resaltar, patrones de la microestructura de materiales. Con el avance de los microprocesadores, como DSP (digital signal processor), de bajo costo; se impulsó el procesamiento de imágenes con altas tasas de eficiencia. En la actualidad dispone de programas dedicados exclusivamente para el procesamiento de imágenes, la gran mayoría, sin embargo, no de código abierto, lo que restringe su uso. ^[8]

2.2.1 IMAGEN Y PROCESAMIENTO DIGITAL

2.2.1.1 Imagen

Una imagen está definida como la representación de un objeto real (3D) en el plano (2D). Desde un punto de vista físico, una imagen puede considerarse como un objeto plano cuya intensidad luminosa y color puede variar de un punto a otro, las imágenes monocromas (blanco y negro), se pueden representar como una función continua $f(x,y)$, donde (x,y) son sus coordenadas y el valor de f es proporcional a la intensidad luminosa (nivel de gris) en ese punto. ^[9]

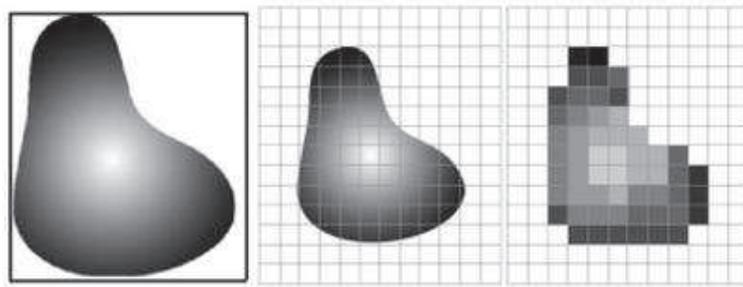


Figura 2.1 Digitalización de un objeto. ^[9]

Para que una imagen pueda ser tratada por el ordenador, es preciso someter la función $f(x,y)$ a un proceso de discretización (extraer de un conjunto infinito de puntos una cantidad finita, de manera que aumentando el número de puntos, el conjunto finito tienda a ser continuo), tanto en las coordenadas como en la intensidad, a este proceso se le denomina digitalización.

2.2.1.2 Digitalización

La digitalización consiste en la descomposición de la imagen en una matriz de $M \times N$, donde cada uno tiene un valor proporcional a su nivel de gris, figura 2.2. Este valor puede ser cualquiera dentro de un rango continuo, es preciso dividir dicho rango en una serie de k intervalos, de forma que el nivel de gris de cada punto sea asignado a uno de los valores que representa dicho intervalo. Los modernos sistemas de proceso digital de imágenes suelen trabajar con 256 niveles de gris.

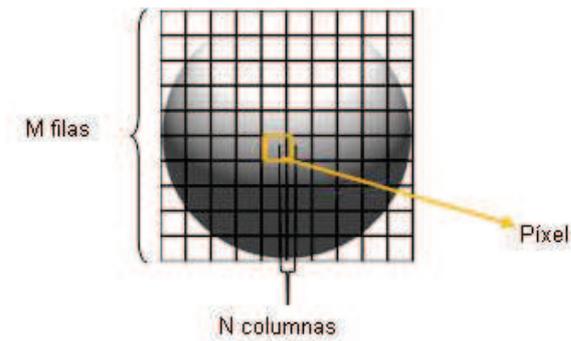


Figura 2.2 Descomposición de un objeto en una matriz MxN

Cada elemento en que se divide la imagen recibe el nombre de "píxel" (picture element). El número de niveles de gris y las dimensiones de la matriz (número de filas por número de columnas) condicionan la capacidad de resolución de la imagen digital. Las dimensiones de las imágenes digitales varían en función de las capacidades del sistema empleado. Por lo general se utiliza un octeto para almacenar cada píxel, por lo que las intensidades de las imágenes se cuantifican en 256 niveles (8 bits). Según estos tamaños, una imagen digital con 256 niveles de gris y una dimensión de 256 x 256 píxeles, ocupa 64 KB de memoria. La misma imagen con una dimensión de 512 x 512 píxeles ocupa 256 KB y si se trata de una imagen de 1024 x 1024 ocupa 1 MB de memoria.^[9]

El procesamiento de imágenes es aplicada cuando resulta necesario modificar una imagen para mejorar su apariencia y para destacar algún aspecto de la información que se encuentra contenida

2.3 ETAPAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Estas etapas son una constante para todo software de procesamiento de imágenes, como se indica en la figura 2.3 y su aplicación varía en función del producto deseado, en este caso el análisis metalográfico para la determinación del tamaño de grano y porcentaje de ferrita y perlita en aceros de bajo contenido de carbono.

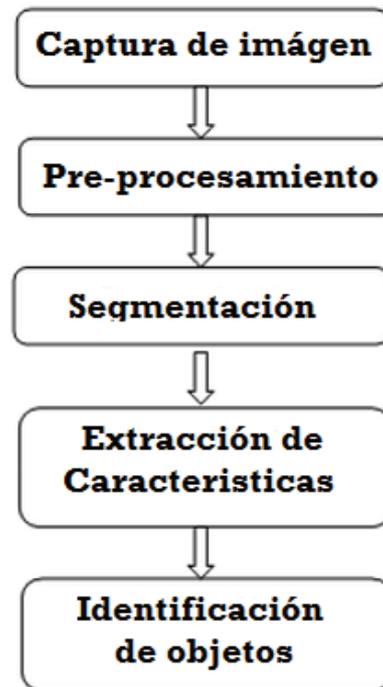


Figura 2.3 Etapas para procesamiento digital de imágenes^[9]

2.3.1 CAPTURA DE IMAGEN

Proceso en el cual trata de convertir un objeto o una imagen digital, para ser procesada por una computadora. Las características de la imagen a capturar dependen del tipo de aplicación. Para el presente trabajo la captura se realiza por medio del microscopio metalográfico, con una magnificación 100x, manipulando la nitidez de la imagen para observar la forma y tipo de grano en la muestra.

2.3.2 PREPROCESAMIENTO

Es un conjunto de técnicas de filtrado de imágenes que se aplican a los píxeles de una imagen digital para optimizarla, mejora las características de enfatizar cierta información, por medio de operaciones matemática como:

Transformada Rápida de Fourier (FFT)	eliminar ruidos,
Dispersiones Gaussiana	facilitar la dispersión,
Convolución	suavizar contornos
Desconvolución	disminuir empañamientos

Las principales técnicas de filtrado son:

- Eliminar ruido, eliminar los píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos.
- Suavizar la imagen: reducir las variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- Detectar bordes: detectar los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.
- Realzar bordes: destacar los bordes que se localizan en una imagen.

2.3.3 SEGMENTACIÓN

Divide la imagen en regiones o segmentos manipulables en escala de grises, por ejemplo las regiones que tienen niveles de grises similares son un segmento, en cambio sí existen cambios bruscos en el nivel de gris se crea otro segmento, detectando las fronteras o bordes de la imagen

En el procesamiento de imágenes una de las tareas con mayor dificultad es la segmentación, ya que de ésta depende la interpretación de resultados.

2.3.4 EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Es un proceso de descripción o reconocimiento de los elementos encontrados en la segmentación, para obtener información a partir de dichos elementos con características particulares, tales como: sus características geométricas, tamaño, forma, etc., y para diferenciarlas de otras que también son parte del conjunto. En esta etapa se extraen las características apropiadas para la identificación de los objetos deseados.

2.3.5 IDENTIFICACIÓN DE OBJETOS

Es un proceso de reconocimiento o interpretación automatizado. En donde las características de la imagen (etapas antes desarrolladas) son comparadas con una base de datos o algoritmos de toma de decisiones, diseñados para ejecutar la tarea final del procesamiento de imágenes, que en este caso es el conteo de regiones o granos de la muestra y porcentajes de ferrita y perlita.

2.4 MÉTODOS ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO SEGÚN NORMA ASTM E-122

Una de las mediciones microestructurales cuantitativas más comunes es la medición del tamaño de grano de metales y aleaciones. Existen varios procedimientos que se han desarrollado para estimar el tamaño de grano, la ASTM (American Society for Testing and Materials) ha sintetizado todos estos procesos y se explican en detalle en la norma ASTM E112. Los Métodos de Prueba E 112 están diseñados para clasificar el tamaño de grano de las estructuras de grano equiaxiales con una distribución de tamaño normal como los tamaños de grano (G) de ferrita y la perlita. Los principales métodos para la determinación del tamaño se clasifican acorde a la figura 2.4.

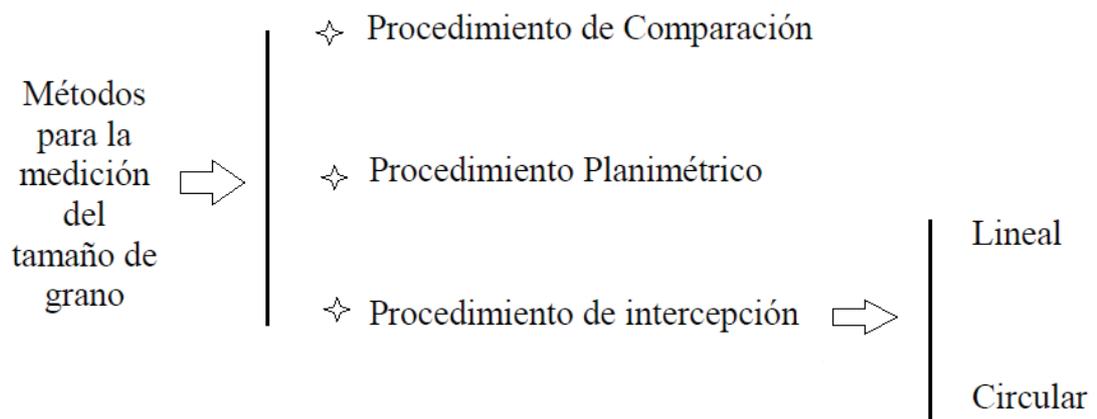


Figura 2.4 Métodos para la determinación del tamaño de grano

2.4.1 PROCEDIMIENTO DE COMPARACIÓN

Este procedimiento involucra la comparación de la estructura de grano con una serie de imágenes graduadas en la plantilla, como se presenta en la figura 2.5. Este método es sencillo, según la norma ASTM E-112 (anexo 3), se utiliza una plantilla de acetato en la que se diferencian secciones circulares graduadas con los diferentes tamaños de grano. Esta plantilla tiene una forma circular con un diámetro exterior de 175 milímetros, éste diámetro debe coincidir con el borde de la imagen impresa de la micrografía.

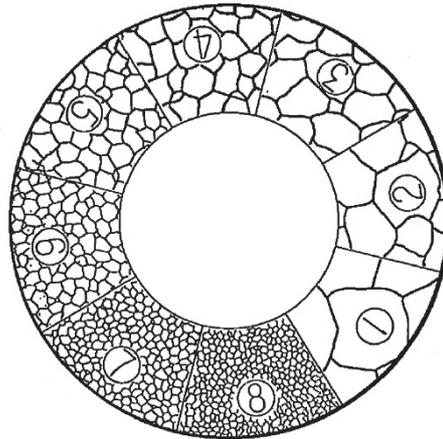


Figura 2.5 Plantilla comparativa para determinar tamaño de grano^[10]

Cada sección de la plantilla comparativa tiene un número “G” que indica el tamaño el grano si se observa la probeta a una magnificación de 100x. En caso de utilizar otra magnificación el valor resultante debe corregirse mediante un factor de corrección denominado “Q” como se indica en la ecuación (2.1).

Factor de corrección, se detalla en la ecuación 2.1 y en la tabla 2.5.

$$Q = 6,64 \text{Log}_{10} \left(\frac{M}{M_b} \right) \quad (2.1)$$

para $M_b = 100x$; $M = \text{Magnificación}$

Tabla 2.5 Factor de corrección para determinar tamaño de grano^[10]

Magnificación M	Factor de corrección Q
50x	-2
100x	0
200x	2
400x	4

2.4.2 PROCEDIMIENTO PLANIMÉTRICO

Este procedimiento involucra el conteo del número de granos dentro de un área determinada utilizando la norma ASTM E-112, para ello se utiliza la plantilla

ilustrada en la figura 2.6, que tiene un área de 5000 mm² o en su defecto un diámetro exterior de 175mm. Dicha plantilla debe coincidir con el borde de la imagen de la micrografía como en el procedimiento anterior. Para calcular el tamaño de grano se utiliza la Tabla 4 (Anexo 4) de la norma ASTM E-112, empleando las siguientes relaciones como se muestra en la ecuación (2.2). interceptos

$$N_A = f \left(N_{\text{Interno}} + \frac{N_{\text{Interceptos}}}{2} \right) \quad (2.2)$$

Donde: N_A = Granos por mm²

N_{Interno} = número de granos dentro del círculo

$N_{\text{Interceptos}}$ = número de granos interceptados por el círculo

f = múltiplo de Jeffriess

Para 5000mm², $f = 0.0002 \text{ M}^2$

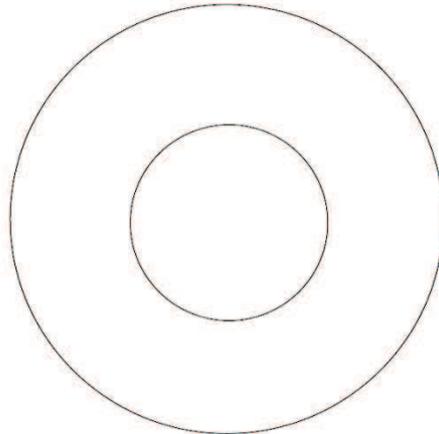


Figura 2.6 Plantilla para método planimétrico ^[10]

2.4.3 PROCEDIMIENTO DE INTERSECCIÓN

Es un procedimiento en el que se tiene que realizar el conteo de las intersecciones sobre la línea base y el límite de grano. El método más utilizado es el de Heyn, que consta de cuatro líneas rectas y cuya suma da una longitud total de 500 mm, ilustrada en la Figura 2.7.

2.4.31 Reglas de conteo (Método de Heyn)

Una intercepción es un segmento de la línea de ensayo que pasa sobre un grano. Una intersección es un punto donde la línea de ensayo es cortada por un borde de grano. Cualquiera de los dos puede contarse con idénticos resultados en un material monofásico. Cuando se cuentan intercepciones, los segmentos al final de la línea de ensayo que penetran dentro de un grano, son anotados como media intercepción. Cuando se cuentan intersecciones, se debe considerar que los puntos extremos de la línea de ensayo no son intersecciones y no son contados excepto cuando tocan exactamente un borde de grano, entonces debe anotarse $\frac{1}{2}$ intersección. Una intersección coincidente con la unión de tres granos debe anotarse como $1 \frac{1}{2}$.^[10]

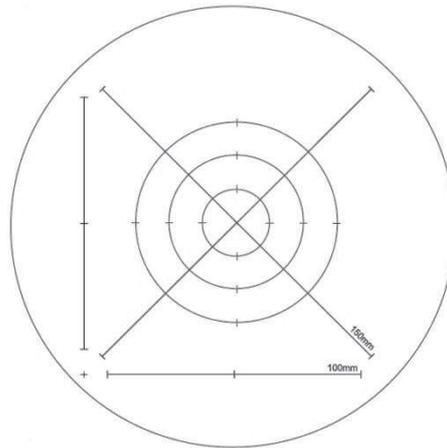


Figura 2.7 Plantilla para método de intersección (Norma ASTM E-112).^[11]

Una vez realizado el conteo se hace uso de la ecuación (2.3) y se calcula el número de grano con la ecuación (2.4).

$$\bar{N}_L = \frac{N_i}{L/M} \quad (2.3)$$

Donde N_i = número de intersecciones totales

L = longitud total de las líneas

M = Magnificación (50x, 100x, 200x, 400x)

Para calcular el tamaño de grano G:

$$G = (6.643856 * \text{Log}_{10}\bar{N}_L) - 3.288 \quad (2.4)$$

Los procedimientos mencionados anteriormente son didácticos y de fácil aplicación; la captura de la micrografía debe ser lo más nítida posible y aplicar los factores de corrección adecuados acorde a la magnificación de la micrografía de la muestra.

2.5 DETERMINACIÓN DE TAMAÑOS DE GRANO EN ACEROS MEDIANTE LA NORMA ESPAÑOLA UNE 7-280-72

Esta norma establece los métodos metalográficos para determinar el tamaño de grano en aceros ferríticos-perlíticos y las reglas de valoración.

2.5.1 TAMAÑO DE GRANO

Es una característica de los aceros y sus constituyentes, los cuales influyen decisivamente en las propiedades de los aceros. Estos constituyentes pueden presentar una estructura ferrítica (aceros suaves) o perlítica (aceros eutectoides o austeníticos). También pueden presentar varios constituyentes como por ejemplo las estructuras ferrítico-perlíticas, ferrita y austenita, cementita y perlita. ^[14]

2.5.2 ÍNDICE G

Es el número G entero positivo, nulo o eventualmente negativo que se deduce a partir del número medio, m, de granos que se pueden contar en un área de un 1mm^2 de la sección de la muestra. Por definición $G = 1$ cuando $m = 16$. Los valores G y m están relacionados por las fórmula 2.5. ^[14]

$$m = 8 \cdot 2^G \quad (2.5)$$

El tamaño de grano se caracteriza por un índice obtenido por unos de los siguientes métodos:

- Por comparación con imágenes tipo para medir el tamaño de grano.
- Por recuento directo que determine el número de granos por unidad de superficie de la muestra.
- Por recuento de granos cortados por una línea (método de Heyn).

2.5.3 MÉTODO DE VALORACIÓN POR RECuento DIRECTO

Este método se encarga de contar granos equiaxiales y no equiaxiales, según la norma española UNE 7-280-72, el conteo se delimita por un área circular de 5000mm^2 o un diámetro de $79,8\text{mm}$, para lo cual, se cuenta los granos interiores n_1 y los granos que son cortados por la línea de circunferencia n_2 como se indica en la figura 2.8 y la ecuación 2.5. El número equivalente de granos enteros se determina por la fórmula 2.6, y mediante la tabla III de la norma (Anexo 4), que determina el tamaño de grano G según el número de granos contados en la muestra. ^[14]

$$n = n_1 + \frac{1}{2}n_2 \quad (2.6)$$

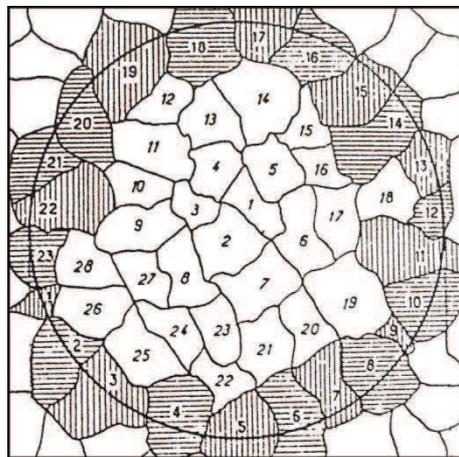


Figura 2.8 Recuento convencional del número de granos observados ^[14]

El presente trabajo se enfoca en automatizar la determinación del tamaño de grano mediante la elaboración de un software de código abierto para el procesamiento de imágenes enfocado al análisis metalográfico para la determinación del tamaño de grano y porcentaje de fases ferrítico-perlíticas en aceros de bajo contenido de carbono. Para lograrlo se utiliza el método de

valoración por recuento directo y la Tabla III (Valores de los índices de tamaño de grano G) de la Norma Española UNE 7-280-72.

2.6 ALTERNATIVAS DE LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Para la elaboración del software se realiza un estudio de selección de los lenguajes de programación más adecuados para el procesamiento de imágenes. En la tabla 2.6, se establecen los criterios de selección y la ponderación de cada uno de los parámetros de acuerdo a las características necesarias para elaborar el software de procesamiento de imágenes.

Tabla 2.6 Criterios de selección

CRITERIOS DE SELECCIÓN		
Criterios	Determinaciones	Ponderación
I. Concepto	¿Cumple con las funciones y prestaciones específicas? ¿Su lenguaje de programación es conocido?	0.1
II. Prestaciones	¿Presenta librerías enfocadas al procesamiento de imágenes? ¿Su lenguaje de programación es simple?	0.2
III. Confiabilidad	¿Los datos resultantes son confiables? ¿Maneja gran cantidad de datos sin problema?	0.2
IV. Portabilidad	¿Su lenguaje de programación es de código abierto? ¿Funciona en cualquier tipo de sistema operativo?	0.3
V. Ergonomía	¿Su interfaz gráfica es amigable con el usuario? ¿La entrada y salida de datos es rápida?	0.2
TOTAL		1.0

Con los criterios de selección presentados en la tabla 2.6 se realiza una serie de cálculos simples y generalizados para cada alternativa.

Las alternativas viables para la elaboración del programa son:

Alternativa A: Lenguaje de programación JAVA

Alternativa B: Lenguaje de programación Python

Alternativa C: Lenguaje de programación C++

Alternativa D: Lenguaje de programación VISUAL BASIC

2.6.1 ALTERNATIVA A: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN *JAVA*

Java es un lenguaje de programación desarrollado por Sun Microsystems a principios de los años 90, con una larga experiencia en la programación para el desarrollo de procesos y también dirigido a objetos, En el 2007, Sun Microsystems liberó la mayor parte de sus tecnologías Java bajo la licencia GPL, de acuerdo con las especificaciones del Java Community Process, de tal forma que prácticamente todo el Java de Sun es ahora software libre. Las licencias GPL se encargan principalmente de proteger la libre distribución, modificación y uso de software. Declarando que el software cubierto por esta licencia es software libre y para protegerlo de intentos de apropiación que restrinjan esas libertades a los usuarios.

Ventajas:

- Presenta una gran cantidad de programadores o librerías.
- Gran potencia y capacidad de respuesta; existen librerías dedicadas al procesamiento de objetos.
- Provee una manera muy didáctica para programar.

Desventajas:

- Su curva de aprendizaje es muy pesada, el lenguaje es muy complejo y no facilita la programación.
- El tiempo de desarrollo y rapidez de respuesta es lento.
- La implementación de esta tecnología es más costosa y escasa.

En la tabla 2.7 se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa de la alternativa A.

Tabla 2.7 Evaluación cualitativa y cuantitativa de la alternativa A

CRITERIOS DE SELECCIÓN		
Criterios	Determinaciones	Ponderación
I. Concepto	Es un lenguaje de programación muy conocido. Cumple con las funciones y prestaciones necesarias para la elaboración de programas.	8
II. Prestaciones	Tiene librerías enfocadas al procesamiento de imágenes que ayuda a la obtención e interpretación de resultados.	8
III. Confiabilidad	Su interpretación de datos es muy confiable aunque lo realiza en 3 etapas, interpretación de código fuente, bytecode ejecutado en un máquina virtual y luego en una maquina física	9
IV. Portabilidad	Su lenguaje de programación es de código abierto, pero utiliza licencia GLP. Presenta fácil accesibilidad.	7
V. Ergonomía	La programación es didáctica, facilitando el aprendizaje. La entrada y salida de datos es rápida.	8

2.6.2 ALTERNATIVA B: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN *PYTHON*

Es un lenguaje de programación muy poderoso y fácil de aprender. Su estructura de datos es eficiente y de alto nivel, presenta un enfoque efectivo en la programación orientada a objetos. Es un lenguaje que presenta varias aplicaciones en diversas áreas y se lo encuentra en la mayoría de las plataformas, igualmente posee una amplia biblioteca, la misma que se encuentra a libre disposición para las principales plataformas desde el sitio web de Python, (<http://www.python.org/>). Su software es de código abierto, esto quiere decir que

se pueden distribuir libremente copias de este software, acceder a su código fuente, realizar cambios, usar partes del mismo para la creación de programas más eficientes sin partir desde cero. Se puede usar sobre la mayoría de sistemas operativos como Linux, Windows, Macintosh, Solaris, OS/2, Amiga, AROS, AS/400, BeOS, OS/390, z/OS, Palm OS, QNX, etc.

En Python, no existen compilaciones separadas y pasos de ejecución. Sólo se ejecuta el programa desde el código fuente, internamente, *Python* convierte el código fuente en una forma intermedia llamada bytecodes, después los traduce en el lenguaje nativo de la computadora y se ejecuta el programa. En lenguaje orientado a objetos, consta con todas las etapas de procesamiento de imágenes en donde se combinan datos y funcionalidad, especialmente, cuando se compara con lenguajes como C++ o Java.

Python contiene una gran cantidad de librerías y funciones incorporadas en el propio lenguaje las cuales ayudan a realizar varias tareas sin necesidad de tener que volver a programarlas.

Principales ventajas:

- Su software es libre o de código abierto, su plataforma se encuentra en la red.
- Presenta una curva de aprendizaje muy suave, es un lenguaje de muy alto nivel casi aproximándose al lenguaje humano, dejando de lado a muchos otros lenguajes de programación.
- Su ejecución es similar a Java con bytecode, proporcionando alto nivel de programación.
- Implementa una gran cantidad de bibliotecas, resaltando las bibliotecas de manipulación y procesamiento de imágenes.
- Grandes empresas han optado por trabajar con este lenguaje de programación como Google, Yahoo y la Nasa.

Desventajas:

- No hay muchos programadores en esta tecnología y la documentación es muy escasa en español.
- Algunas librerías presentan problemas con el sistema operativo Windows.

En la tabla 2.8, se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa de la alternativa B.

Tabla 2.8 Evaluación cualitativa y cuantitativa Alternativa B

Criterios	Evaluación cualitativa	Evaluación cuantitativa
I. Concepto	Es un lenguaje de programación de alto nivel muy funcional, es muy conocido por grandes empresas como Google y la Nasa que actualmente lo están utilizando.	10
II. Prestaciones	Tiene varias librerías orientadas al procesamiento de imágenes, presenta facilidad de programación.	9
III. Confiabilidad	Maneja gran cantidad de datos sin problema y los resultados son muy confiables. Este proceso lo realiza en dos etapas, interpreta el código fuente y luego trabaja con la máquina física.	9
IV. Portabilidad	Su lenguaje de programación es de código abierto, sin ninguna restricción como JAVA. Python utiliza la plataforma Windows (cumple con el objetivo planteado).	10
V. Ergonomía	Presenta una velocidad de entrada y salida de datos 5 veces más rápida que JAVA, y su interfaz gráfica es muy didáctica (sus librerías facilitan la programación).	9

2.6.3 ALTERNATIVA C: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C++

C++ es un lenguaje de programación diseñado a mediados de los años 1980. Principalmente utilizado para programación estructural, con el transcurso del tiempo el lenguaje de programación C++ se extiende a la manipulación de objetos, desde el punto de vista de los lenguajes de programación orientados a objetos, el C++ es un lenguaje híbrido, al cual se añaden facilidades de

programación en donde se integra la programación estructurada y la programación orientada a objetos (esto hace que los procesos utilicen más tiempo). Una particularidad del C++ es la posibilidad de redefinir los operadores y de poder crear nuevos tipos que se comporten como tipos fundamentales.

Ventajas

- Puede crear sistemas complejos
- Lenguaje muy didáctico, gracias a este se pueden aprender otros lenguajes con gran facilidad.
- Existen muchos algoritmos que facilitan la programación

Desventajas:

- Uso de DLLs (librerías dinámicas) muy complejo y utiliza mucha memoria para su ejecución.
- No es recomendable para desarrollo de páginas Web.
- Elaborar un sistema en C++ es como construir un rascacielos, pues presenta un buen soporte y es robusto, pero si existen errores en los pisos inferiores toda la parte superior se viene abajo terriblemente.
- No existen estándares para los entornos de programación así que existe para cada sistema operativo, igual que para sus aplicaciones gráficas.

En la tabla 2.9 se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa de la alternativa C.

Tabla 2.9 Criterios de selección Alternativa C

Criterios	Evaluación cualitativa	Evaluación cuantitativa
VI. Concepto	Es un lenguaje muy conocido y muy utilizado, pero si uno de sus códigos falla la programación no compila.	8
VII. Prestaciones	Posee librerías orientadas a la manipulación de objetos, pero al cargarse, esta librería debe liberar memoria haciéndolo lento.	7

VIII. Confiabilidad	Sus resultados son muy confiables, pero se debe tener cuidado con la programación de los paquetes (librerías) que se van a utilizar.	8
IX. Portabilidad	Existen pocos paquetes liberados, pero al igual que JAVA tiene restricciones de uso. También puede utilizarse la plataforma Windows	6
X. Ergonomía	Su interfaz gráfica es muy didáctica, pero el uso de sus librerías es complejo. Como es un lenguaje híbrido sus resultados necesitan más tiempo de interpretación.	7

2.6.4 ALTERNATIVA D: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN *VISUAL BASIC*

Es una manera rápida y sencilla de crear programas para Microsoft Windows. Dispone de un completo conjunto de herramientas para simplificar las tareas de desarrollo.

Visual Basic hace referencia a "Visual" que es el método utilizado para crear lo que ve el usuario, la interfaz gráfica de usuario o GUI. "Basic" hace referencia al lenguaje de programación BASIC, de Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code (Código de Instrucción Simbólico Todo Propósito para Principiantes), un lenguaje utilizado por más programadores que cualquier otro lenguaje en la historia de la informática. Puede crear programas útiles sólo con aprender algunas de sus características.

Ventajas

- Su lenguaje es simple y por lo tanto fácil de aprender.
- Se dibuja formularios mediante el arrastre de controles.
- Tiene una librería orientada a objetos muy sencilla y de fácil utilización.
- Posee una curva de aprendizaje muy rápida.
- Se puede encontrar información, documentación y fuentes para los proyectos en la web.

Desventajas

- Genera ejecutables sólo para Windows.
- Sólo existe un compilador, llamado igual que el lenguaje.
- La sintaxis es demasiado inflexible.
- Programas elaborados son relativamente lentos.
- Presenta problemas en aplicaciones multimedia, videojuegos, editores gráficos, etc.

En la tabla 2.10, se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa de la alternativa D.

Tabla 2.10 Criterios de selección

Criterios	Evaluación cualitativa	Evaluación cuantitativa
XI. Concepto	Uno de los primeros lenguajes de programación y de los más utilizados, conocidos, y de rápido aprendizaje. No posee las características para la programación.	8
XII. Prestaciones	No es adecuado para realizar operaciones como la manipulación de objetos, utilizaría mucho tiempo en la interpretación de resultados.	5
XIII. Confiabilidad	Los resultados son confiables, pero no es aconsejable manejar cantidades grandes de datos.	7
XIV. Portabilidad	Su lenguaje de programación no es de código abierto y sólo funciona en la plataforma Windows.	6
XV. Ergonomía	No es comparable la rapidez de respuesta con ninguno de los lenguajes antes mencionados, pero su interfaz gráfica es muy didáctica.	7

2.7 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Mediante las tablas 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 se desarrolla la tabla 2.11 con la cual se determina la alternativa más adecuada para desarrollar el software de procesamiento e imágenes.

Tabla 2.11 Selección de la alternativa para elaboración de software

ALTERNATIVAS	CRITERIOS DE SELECCIÓN					Ponderación	
	I	II	III	IV	V		
A	8	8	9	7	8	0,1	I
B	10	9	9	10	9	0,2	II
C	8	7	8	6	7	0,2	III
D	8	5	7	6	7	0,3	IV
						0,2	V
Total	34	29	33	29	31	1	

Tabla 2.11 Normalizada

ALTERNATIVAS	CRITERIOS DE SELECCIÓN					Ponderación	
	I	II	III	IV	V		
A	0,235	0,276	0,273	0,241	0,258	0,1	I
B	0,294	0,310	0,273	0,345	0,290	0,2	II
C	0,235	0,241	0,242	0,207	0,226	0,2	III
D	0,235	0,172	0,212	0,207	0,226	0,3	IV
						0,2	V

Tabla 2.12 Resultados

ALTERNATIVA A	0,257
ALTERNATIVA B	0,308
ALTERNATIVA C	0,228
ALTERNATIVA D	0,208

De la tabla 2.12 se puede concluir que el lenguaje de programación Python es el más apropiado para la elaboración del software de procesamiento de imágenes (alternativa B).

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE

En la actualidad, la implementación de modernas técnicas de digitalización y procesamiento de imágenes facilitan y mejoran la obtención de información. El procesamiento de imágenes se ha desarrollado con fundamentos teóricos y algorítmicos para obtener información de forma automática a partir del análisis de una imagen. En esta se realizará el reconocimiento de objetos, su posición, orientación y la medición de cualquier propiedad espacial (forma y tamaño de grano). En este caso, el procesamiento de imágenes permite analizar, deducir y tomar decisiones acorde al tipo de software utilizado para el análisis, por ejemplo en aplicaciones como la metalografía realizará la detección de las estructuras cristalinas, la medición de características geométricas, la clasificación de regiones de distintos componentes y la determinación de defectos e inclusiones presente en la microestructura.

3.1 CÓDIGO FUENTE

El código fuente es un conjunto de líneas de texto o códigos que debe seguir el computador para realizar o ejecutar algún programa. Dicho código fuente debe estar escrito en un programador y en algún lenguaje de programación (este caso se utilizara Python como lenguaje de programación). En el código fuente de un programa está escrito por completo su funcionamiento y mediante el uso de un compilador o intérpretes de lenguajes de programación se encargan de ejecutar el software o programa elaborado.

Hay tener en cuenta que el lenguaje de programación Python es un software libre que permite el acceso al código fuente de un algún programa para que pueda ser estudiado, modificado y utilizado, logrando así un mejor avance en el conocimiento científico sin partir desde cero.

3.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON APLICADO A PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Python es un lenguaje de programación de plataforma independiente orientado a objetos. Es un lenguaje interpretado, esto quiere decir, que no se necesita compilar el código fuente para realizar la ejecución del programa, esta es una ventaja ya que la ayuda a la rapidez de desarrollo y minimiza la reutilización de códigos en la programación. Dispone de varias funciones incorporadas en el propio lenguaje, para el procesamiento de imágenes y con la ayuda de amplias librerías orientadas a objetos que también posee, facilitan la interpretación de resultados y toma de decisiones al momento de analizar una imagen o micrografía. Las librerías más utilizadas para el procesamiento de imágenes son: Pil, Matplotlib, Scipy, Numpy, entre otros.

3.2.1 PAQUETES O LIBRERÍAS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

3.2.1.1 *Matplotlib*

Matplotlib es una biblioteca que realiza el trazado en dos dimensiones, produce figuras de calidad de publicación para gráficas interactivas, publicaciones científicas y ayuda al desarrollo de interfaces de usuario y los servidores de aplicaciones web en una variedad de formatos de salida y entornos interactivos, *matplotlib* se puede utilizar en *scripts python*, *ipython shell* (como MATLAB® o Mathematica®) y servidores de aplicaciones web.

Trata de hacer las cosas fáciles optimizando tiempo y recursos (memoria). Puede generar gráficos, histogramas, espectros de potencia, gráficos de barras, diagramas de dispersión, etc., a partir de una función especificada y con sólo unas pocas líneas de código. En la figura 3.1 se muestran miniaturas de galería y ejemplos de directorio.

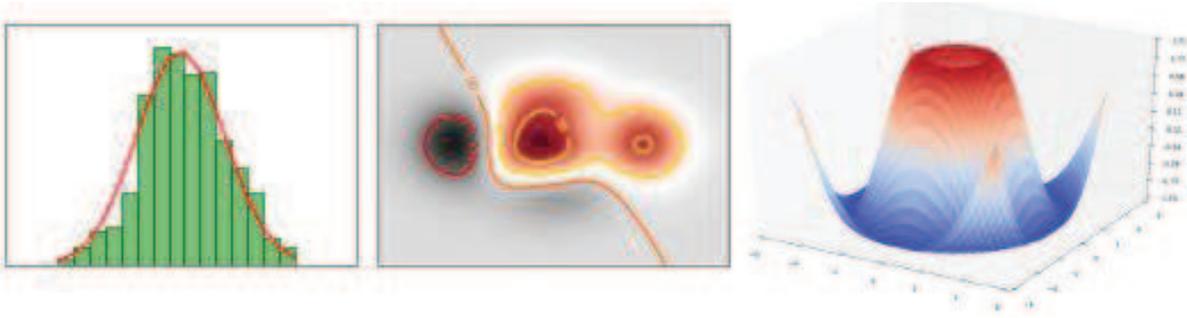


Figura 3.1 Ejemplos de directorio librería matplotlib

3.2.1.2 *Numpy*

Es un paquete fundamental para la computación científica con Python. Contiene entre otras cosas, un poderoso sistema de manejo de matriz N-dimensional y sofisticadas funciones, es una herramienta para la integración. Posee funciones de álgebra lineal, transformaciones de Fourier, convolución y la generación de números aleatorios los cuales son indispensables para el procesamiento de imágenes. Además de sus usos científicos, *Numpy* funciona como una matriz de propósito general diseñada para manipular eficientemente grandes cantidades de datos multidimensionales de registros arbitrarios sin sacrificar demasiada velocidad en matrices pequeñas. Esto permite a *Numpy* trabajar sin problemas y de manera rápida a una amplia variedad de bases de datos, en este caso para el procesamiento de imágenes serán los pixeles de la imagen digital.

3.2.1.3 *Scipy*

Scipy es una herramienta empleada para las matemáticas, la ciencia y la ingeniería. Esta biblioteca depende del paquete Numpy, que proporciona una rápida y cómoda manipulación de matrices n-dimensionales. El paquete Scipy está diseñado para trabajar con matrices Numpy y proporciona varias rutinas numéricas, fáciles de usar y eficientes para la integración numérica y optimización. Juntos son muy potentes en la manipulación de gran cantidad de datos y la obtención de datos resultantes del manejo de segmentos en escala de grises de la imagen analizadas.

3.2.1.4 Pil

El paquete o librería PIL (Python Imaging Library) proporciona una eficiente representación de datos interna y capacidades de procesamiento de imágenes bastante potentes, está diseñado para un rápido acceso a los datos almacenados en formatos básicos de píxeles, proporcionando una base sólida para una herramienta general de procesamiento de imágenes. Python Imaging Library es ideal para las aplicaciones de procesamiento de archivos de imagen. Se puede utilizar la biblioteca para crear miniaturas, convertir entre formatos de archivo, imprimir imágenes, etc. Identifica y lee un gran número de formatos.

En el procesamiento de imágenes ésta biblioteca contiene la funcionalidad básica del procesamiento de imágenes, incluyendo operaciones de punto, filtrar con un conjunto de núcleos de convolución integradas y las conversiones de espacio de color, también puede ajustar los tamaños de imagen, rotaciones y transformaciones afines arbitrarias. Posee un método de histograma que permite trabajar con datos estadísticos de una imagen analizada. Esto se puede utilizar para la mejora del contraste automático y para el análisis estadístico global.

3.3 CÓDIGO PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DE GRANO Y PORCENTAJE DE FASES

Para la determinación del tamaño de grano se realizan las etapas del procesamiento de imágenes explicadas en el capítulo 2.3 (Captura de la imagen, reprocesamiento, segmentación, extracción de características e identificación granos), haciendo uso de cada una de las librerías mencionadas anteriormente.

En resumen, el programa segmenta las regiones claras y oscuras de la imagen ingresada y realiza el conteo de las regiones totales y las regiones oscuras. Con el número de regiones totales encontradas en la imagen (método de valoración por recuento directo) y la Tabla III, de la norma Española UNE 7-280-72, se determina el tamaño de grano de la muestra seleccionada.

A continuación se explica la codificación y las etapas del procesamiento de imágenes en lenguaje de programación Python.

Código para importar librerías instaladas para el procesamiento de imágenes

```

from matplotlib import*
from matplotlib.pyplot import*
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.ndimage as ndi
import numpy as np
from PIL import Image

```

Código para importar imágenes

```
img = np.flipud(Image.open('muestra3.jpg'))
```

Para recortar la imagen

```
img_clean = img[:750,750 :]
```

Filtro para obtener los segmentos (en escala de grises)

```
img_med = ndi.median_filter(img_clean, size=5)
```

Rango de valores para distinguir los segmentos

```
sand = (img_med <= 60) ]):
```

Código para mostrar imágenes manipuladas

```

def plot_images(cmap=plt.cm.gray):
    for n, (name, image) in \
        enumerate([('Original', img_med),
                   ('Sand', sand)]):

        plt.subplot(2, 2, n+1)
        plt.imshow(image, cmap=cmap)
        plt.title(name)
        plt.axis('off')

```

Convertir y almacenar resultados

```

sand = sand.astype(int)

for name, img in [('Sand', sand),
                  ('Bubbles', bubbles),
                  ('Glass', glass)]:
    labels, count = ndi.label(img)
    print '%s regions found in %s' % (count, name)
    img[:] = labels

    obj_areas = [np.sum(labels == i) for \
                  i in range(1, labels.max())]
    print "Mean obj area %d" % np.mean(obj_areas)

```

Código para determinar el porcentaje de ferrita y perlita

```

perlita =(object/regions*100)
    print perlita

    ferrita = 100 - (object/regions*100)
    print ferrite

```

Código para determinar el tamaño de grano

```

    if regions>12 and regions<24:
Tama_o_de_grano=(regions-12)*0.084 +1
    elif regions>24 and
regions<48:Tama_o_de_grano=(regions-24)*0.0416 +2
    elif regions>48 and
regions<96:Tama_o_de_grano=(regions-48)*0.0208 +3
    elif regions>96 and
regions<192:Tama_o_de_grano=(regions-96)*0.0104 +4
    elif regions>192 and
regions<384:Tama_o_de_grano=(regions-192)*0.0052 +5

```

```

        elif regions>384 and
regions<768:Tama_o_de_grano=(regions-384)*0.0026 +6
        elif regions>768 and
regions<1536:Tama_o_de_grano=(regions-768)*0.0013 +7
        elif regions>1536 and
regions<3072:Tama_o_de_grano=(regions-1536)*0.00065 +8
        elif regions>3072 and
regions<6144:Tama_o_de_grano=(regions-3072)*0.00032 + 9
        elif regions>6144 and
regions<12288:Tama_o_de_grano=(regions-6144)*0.00016 +10
        elif regions>12288 and
regions<24576:Tama_o_de_grano=(regions-12288)*0.00008 +11
        elif regions>24576 and
regions<49152:Tama_o_de_grano=(regions-24576)*0.00004 +12
        else:Tama_o_de_grano="No existe grano"

print Tama_o_de_grano

res = self.label_Resultados.GetLabel()

```

Código para mostrar los resultados en la interfaz

```

self.label_Resultados.SetLabel("\n""\n""\n""
Resultados""\n""\n" " Porcentaje de Perlita : "+
str("%0.2f"% perlita) +"\n" + " Porcentaje de Ferrita : "+
str("%0.2f"% ferrita)+"\n" + " Tamano de Grano : "+
str("%0.2f"% Tama_o_de_grano))

```

Mostrar los resultados

```

plot_images(cmap=plt.cm.spectral)
show()

```

3.4 INTERFAZ GRÁFICA DEL PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MEDIANTE SOFTWARE LIBRE PYTHON PARA EL ANÁLISIS METALOGRÁFICO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO

3.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica es un programa que interactúa con el usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos (íconos) para representar la información y acciones disponibles del programa. La interfaz gráfica consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para permitir la comunicación entre el software de procesamiento de imágenes y el usuario. De manera que la interfaz gráfica posibilita, a través de su uso, la representación del lenguaje visual y una interacción amigable con un sistema informático.

El código fuente para la realización de la interfaz gráfica del software de procesamiento de imágenes agrupa los códigos anteriores (código para determinar tamaño de grano y porcentaje de fases de ferrita y perlita), tanto para aceros de contenido menor al 15% de carbono como para aceros que presentan contenidos de 0,15% a 0,25% (debido al contenido de perlita) los cuales representan el lenguaje visual para realizar el análisis de las muestras metalográficas.

El código para la realización de la interfaz gráfica del programa se encuentra adjunto en el anexo 7.

CAPÍTULO 4

FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE

4.1 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

Una vez desarrollado el software de procesamiento de imágenes y el procedimiento metalográfico a las muestras y sus micrografías correspondientes, se realiza la ejecución del software de procesamiento. Para la correcta ejecución del software, es necesario seguir los pasos que se indican en el manual de usuario (Revisar MANUAL DE USUARIO PARA SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MEDIANTE SOFTWARE LIBRE PYTHON PARA EL ANÁLISIS METALOGRAFICO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO).

Los resultados: Tamaño de grano, porcentaje de ferrita y porcentaje de perlita obtenidos de la muestra metalográfica se basan en la Norma Española UNE 7-280-72 (Tabla III, Valores de los índices de tamaño de grano, anexo 6).

Cabe señalar que el software está calibrado para dos rangos de contenido de carbono, uno para porcentajes de carbono inferiores al 0,15% y el otro para porcentajes de carbono entre 0,15% y 0,25%. La existencia de estos dos rangos es debido a que el porcentaje de perlita y ferrita varían según el contenido de carbono y para obtener resultados más exactos.

La validación del software elaborado se lo realiza a través un análisis estadístico de varianza (ANOVA) donde se comparán los resultados obtenidos con el software propio y el software PAX-it que posee el laboratorio de metalografía.

En la figura 4.1 se visualiza la interfaz gráfica del programa elaborado.



Figura 4.1 Interfaz gráfica de Software “Procesamiento de imágenes”.

Los resultados obtenidos por el Software “Procesamiento de imágenes” con cada una de las probetas, se ilustran en la tabla 4.13 y sus resultados gráficos en la figura 4.2.

Tabla 4.13 Resultados del software de Procesamiento de imágenes.

No.	Tipo de acero	Número de granos determinados	Tamaño de grano G	% de Ferrita	% de Perlita
1	AISI - 7210 SAE - 8620	4322	9,41	97,276	2,724
2	Mecaplus E- 470	5107	9,66	94,302	5,698
3	A – 36 (Varilla estructural)	5981	9,73	96,756	3,244
4	SAE - 1018	5301	9,73	97,585	2,415

A los resultados gráficos se los puede manipular realizando acercamientos consecutivos con el objetivo de visualizar el tamaño de grano, inclusiones o defectos del material, ya sea por elementos ajenos a su composición o a una mala preparación de la muestra metalográfica.

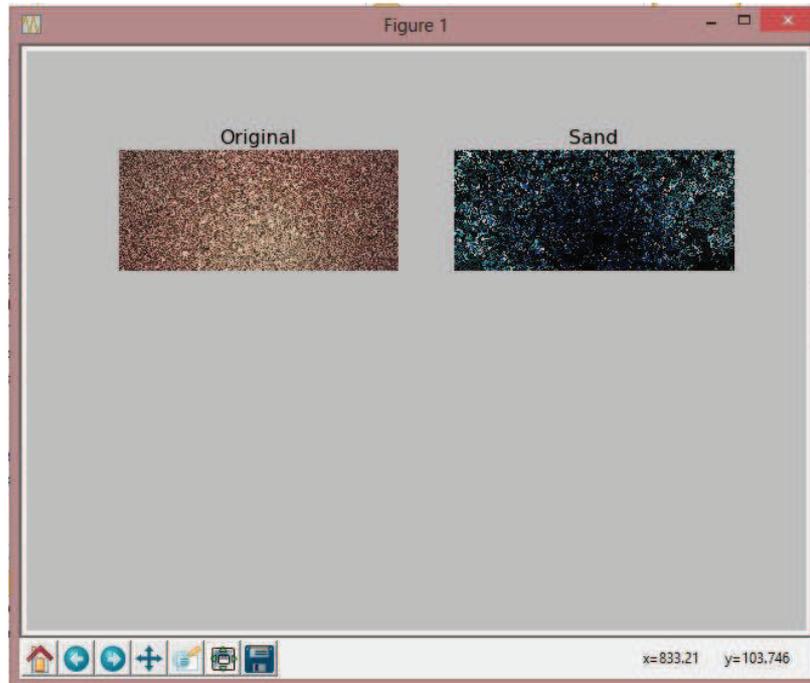


Figura 4.2 Resultados gráficos del software elaborado

4.2 FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE PAX-it

El software PAX-it es un programa de alto nivel elaborado para el análisis metalográfico en la industria, razón por la cual tiene una licencia de distribución y su costo es elevado. Su procesamiento de imágenes se define por el usuario, es decir, el usuario manipula las variables que influyen en la obtención de resultados como: la zona de fraccionamiento, zona de detección y de distribución basada en el color, en escala de grises, tamaño o forma de granos sobre las imágenes capturadas o importadas al software. Se encarga también del análisis de partículas y el recuento de células, la porosidad, la nodularidad, el espesor de recubrimiento / recubrimiento, ferrita / perlita, y la clasificación de tamaño de las grano.

Su funcionamiento es simple, pero para realizar el análisis se efectúa un cambio en el formato de la imagen o micrografía a utilizar, esto se debe a que el software PAX-it utiliza un formato propio de imagen para realizar el análisis, este proceso es un poco extenso, ya que primero se busca un archivador dentro de una carpeta principal y luego se crea dentro del archivador una subcarpeta en la cual se ubicarán las imágenes cambiadas de formato; hay que tomar en cuenta que dicho cambio de formato se lo realiza imagen por imagen. Una vez realizado el cambio de formato, se accede a la interfaz gráfica del PAX-it para determinar los porcentajes de ferrita y perlita de la muestra, pero para realizar esta operación el programa solicita que se manipule el grado de segmentación (grado de coloración acentuada en la imagen) de la imagen para la determinación de las fases ferrítico-perlíticas como se indica en la figura 4.3. Esto quiere decir que, para determinar el porcentaje de fases de cualquier muestra hay que tener conocimiento del tipo de material que se está analizando y cuál es el rango en porcentaje de sus componentes en la aleación, para que al momento de segmentar la imagen (coloración verde la ferrita) su segmentación sea coherente con la muestra a analizar. Para el caso de aceros de bajo contenido de carbono el porcentaje de perlita no debe ser superior al 10%, por lo que el grado de segmentación realizada a las muestras metalográficas en el PAX-it es de 5 o 6 según el usuario considere conveniente (realizar las consideraciones visualizando la imagen).

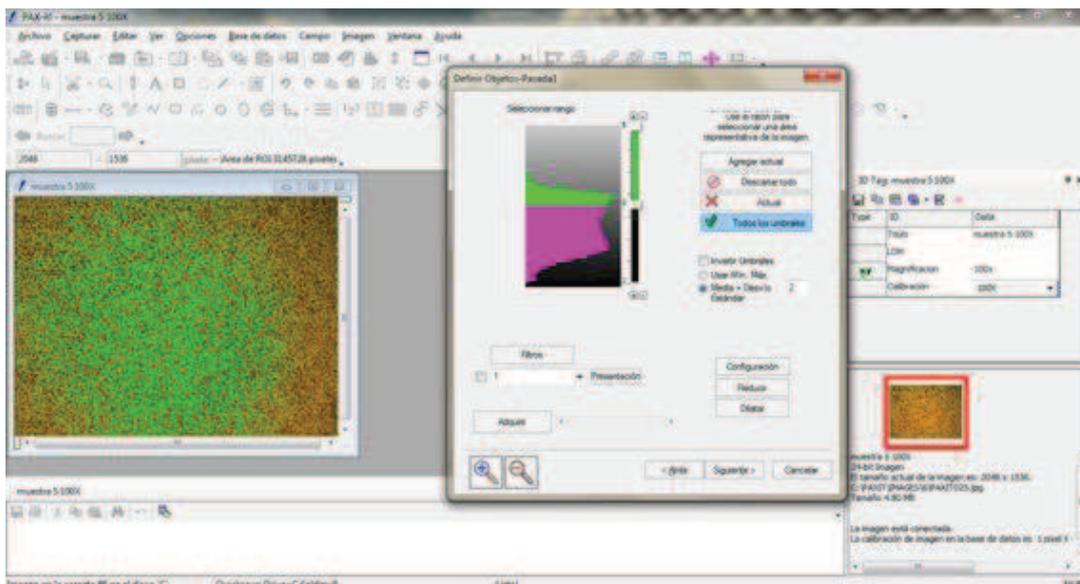


Figura 4.3 Interfaz gráfica del Software PAX-it

En cambio, para la determinación del tamaño de grano hay que elegir uno de los métodos (intersección de líneas, círculos concéntricos y líneas paralelas) que utiliza PAX-it para el análisis de tamaño de grano, en la figura 4.4 se ilustra la interfaz del método de intersección de líneas utilizado, sin realizar manipulación alguna en la interfaz del programa.

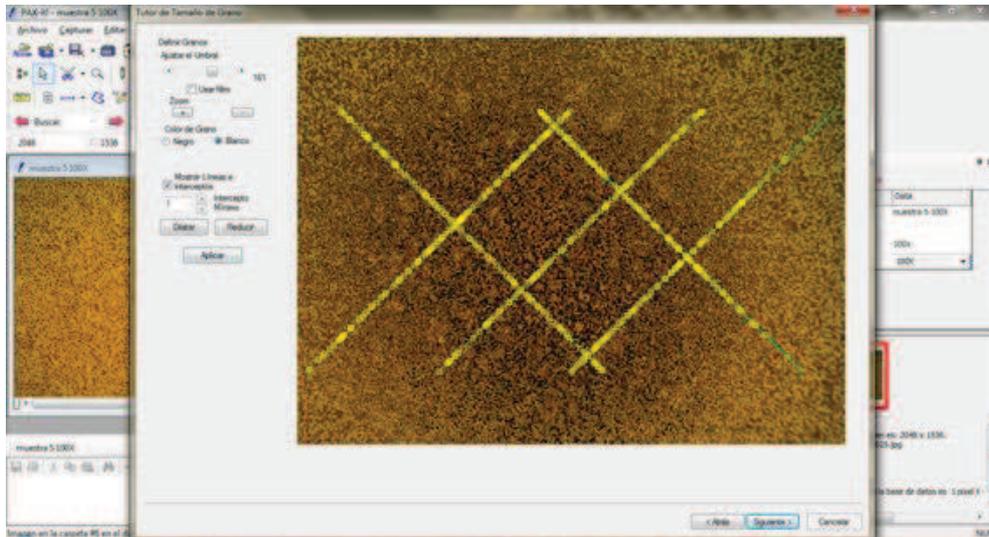


Figura 4.4 Selección de método para la determinación de tamaño de grano en PAX-it

Con el método de cálculo establecido se obtienen los resultados de tamaño de grano y con el proceso anterior, el porcentaje de fases, figura 4.5 y figura 4.6.

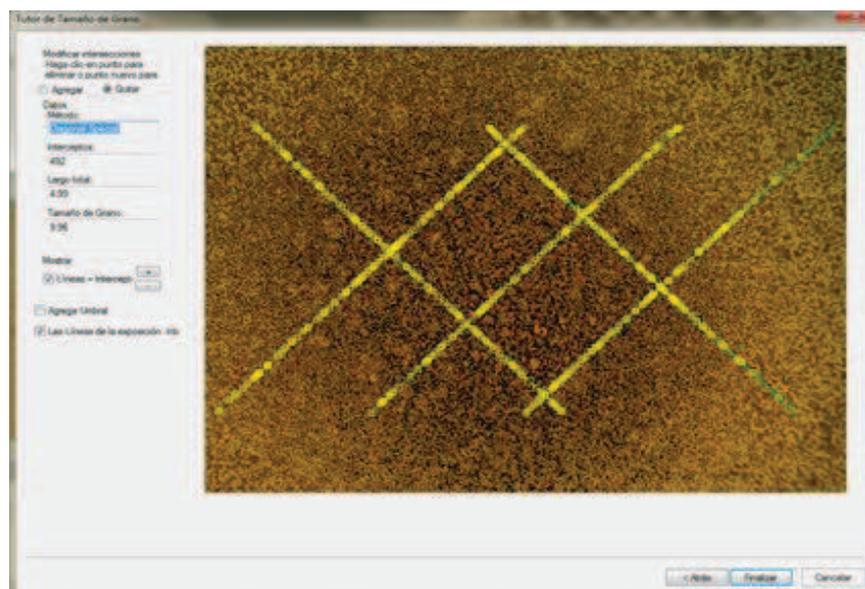


Figura 4.5 Tamaño de grano determinado

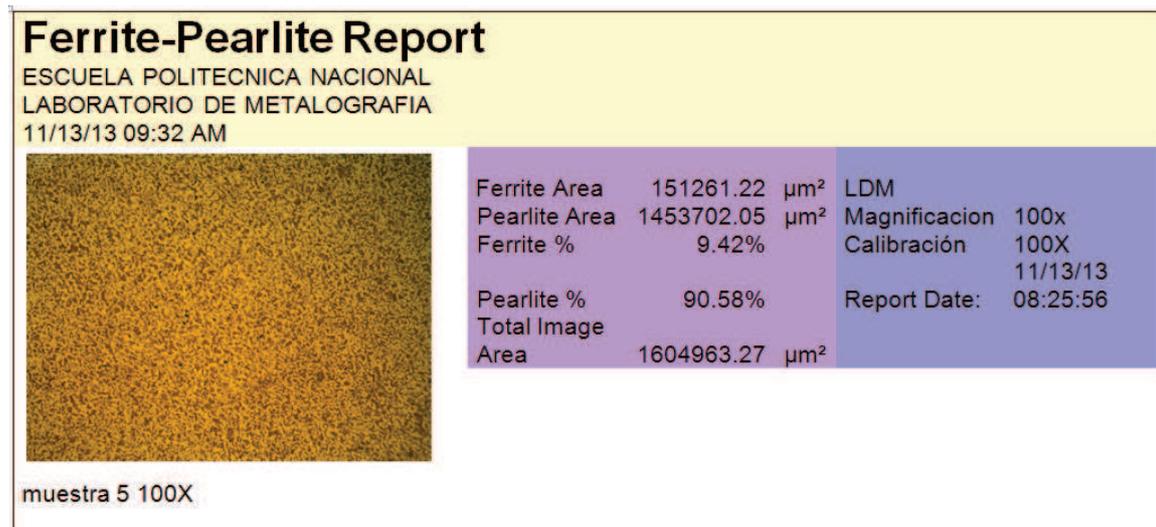


Figura 4.6 Porcentaje de ferrita y perlita PAX-it

El mismo procedimiento, explicado anteriormente, se realiza con cada una de las probetas para obtener los resultados correspondientes. En la tabla 4.14 se muestran los resultados obtenidos en el software del laboratorio PAX-it.

Tabla 4.14 Resultados del software PAX-it

Probeta	Tipo de acero	Tamaño de grano G	% de Fases	Software PAX-it
1	AISI - 7210 SAE - 8620	10.34	%ferrita %perlita	96,69 5,31
2	Mecaplus E-470	9.83	%ferrita %perlita	92,94 7,06
3	A - 36 (Varilla estructural)	9.64	%ferrita %perlita	92,13 7,87
4	SAE - 1018	9.96	%ferrita %perlita	90,58 9,42

4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y OBTENCIÓN DE ERRORES

Utilizando las Tablas 4.13 y 4.14 se realiza una tabla comparativa donde se calcula el error entre los tamaños de grano y el error entre porcentajes de ferrita y perlita, los cuales se indican en la tabla 4.15 y 4.16.

Tabla 4.15 Comparación de tamaño de grano con software PAX-it

Probeta	Tamaño de grano G	Tamaño de grano "PAX-it"	Porcentaje de Error
1	9,41	10.34	8,99%
2	9,66	9.83	1,73%
3	9,73	9.64	0,92%
4	9,73	9.96	0,72%

La diferencia de resultados obtenidos por los programas utilizados es aceptable pues se tiene un rango de error menor al 2%. Aunque, en la probeta 1 se tiene error de 8,99% debido a que el resultado del tamaño de grana en el PAX-it es de 10,34 lo cual se desvía de la media del tamaño de grano.

Tabla 4.16 Comparación de mezcla de fases (ferrita, perlita)

Probeta	% de Fases	Software elaborado	Software PAX-it	Porcentaje de Error
1	%ferrita	97,276	96,69	0,60
	%perlita	2,724	5,31	48,70
2	%ferrita	94,302	92,94	1,44
	%perlita	5,698	7,06	19,29
3	%ferrita	96,756	92,13	4,78
	%perlita	3,244	7,87	58,78
4	%ferrita	97,585	90,58	7,17
	%perlita	2,415	9,42	74,36

Los porcentajes de composición de ferrita y perlita de las diferentes muestras metalográficas se encuentran dentro de los valores esperados, pero al comparar los resultados del software elaborado con los del software PAX-it, se verifica que se encuentran diferencias significativas en los porcentajes de perlita.

Para verificar la certeza de los resultados del software de "Procesamiento de imágenes" se realiza un análisis de varianza (ANOVA) mediante la comparación de resultados obtenidos por software PAX-it y el software elaborado.

4.4 ANÁLISIS DE VARIANZA

El análisis de varianza es una técnica estadística que nos permite, entre otras cosas, comparar dos o más medias de forma simultánea. Este análisis plantea el problema como un modelo matemático, en el cual la variable dependiente es la variable cuantitativa, y la variable independiente la variable cualitativa, también llamada factor. ^[16]

4.4.1 VARIANZA DENTRO DE GRUPOS

La varianza dentro de grupos mide la variabilidad dentro de cada grupo y cada una de las k varianzas, intragrupo es un estimador de la varianza poblacional σ^2 .

4.4.2 LA VARIANZA ENTRE GRUPOS

Otra estimación de la varianza poblacional podemos realizarla a partir del error estándar de la media, recuérdese que el error estándar de la media es la desviación típica de la distribución de medias muestrales.

4.4.3 DETECCIÓN DE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS

El análisis de varianza se basa en que, si existen diferencias significativas entre las medias de cada grupo, la varianza entre grupos se verá incrementada y por lo tanto será significativamente distinta y mayor que la varianza dentro de grupos; esta diferencia será detectada por la prueba F de Snedecor. Si la prueba F de Snedecor detecta diferencias significativas entre la varianza dentro de grupos y la varianza entre grupos, ello indica que al menos una de las medias es significativamente distinta de las demás (puede ser una o más de una). De ahí el nombre de análisis de varianza, pues detecta diferencias entre medias analizando diferencias entre varianzas. ^[16]

El análisis de varianza se le conoce casi universalmente por las siglas ANOVA, que corresponden a su nombre en inglés (ANALISYS OF VARIANCE).

4.4.4 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático de ANOVA se basa en descomponer la diferencia entre un elemento y la media global en dos partes: entre grupos, debida al efecto de grupo (si es que lo hay), esta fracción de la variabilidad es la explicada por la variable independiente, y dentro de grupos debido a todas las demás causas, que pueden ser efectos de otras variables no controladas por el modelo. Esto se puede expresar matemáticamente por la ecuación 4.1.

$$X_{ij} - \mu = (\mu_j - \mu) + (X_{ji} - \mu_j) \quad (4.1)$$

X_{ij} es el valor de la variable cuantitativa en el i ésimo elemento del j ésimo grupo, y la diferencia de dicho valor respecto a la media poblacional será debido al efecto del grupo $(\mu_j - \mu)$, más a las diferencias no controladas por el modelo, efecto de otras variables $(X_{ji} - \mu_j)$.

4.4.5 CUADRADOS MEDIOS

La suma de cuadrados representa la suma de las variabilidades cuadráticas, pero para poder ser utilizados en comparaciones necesitamos tener parámetros que estimen la variabilidad cuadrática media. Para conseguir esto, dividiremos las sumas de cuadrados entre sus correspondientes grados de libertad. Los grados de libertad totales son $N-1$, y estos grados de libertad a la suma de los grados de libertad ENTRE GRUPOS más los grados de libertad DENTRO DE GRUPOS. A las desviaciones cuadráticas medias les llamaremos cuadrados medios. En el análisis de varianza solamente vamos a utilizar los cuadrados medios entre y dentro de grupos.

4.4.6 HIPÓTESIS DE ANOVA

Al realizar un análisis de la varianza de una vía, contrastamos a las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \dots = \mu_k \quad \alpha = 0,05$$

$$H_1: \mu_r \neq \mu_s \text{ para algún } r, s$$

La hipótesis nula postula que las medias de todos los grupos en la población son iguales. La hipótesis alternativa postula que al menos hay una media μ_r distinta de otra μ_s . Si hay una sola media que es significativamente distinta de otra, rechazamos la hipótesis nula; por supuesto si las diferencias entre medias son muchas, con mayor motivo se rechazará la hipótesis nula. ^[16]

El análisis de varianza resuelve el problema de comparación de medias, comparados varianzas, de ahí su nombre. Si la diferencia entre las dos varianzas (cuadrados medios) es significativa, indica que existen diferencias significativas entre las medias, por lo que se rechazará la hipótesis nula.

4.4.7 TABLA DE ANOVA (DISPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS)

Los resultados de un análisis de la varianza se disponen en una tabla especial, en la que se muestran los parámetros fundamentales en ANOVA. Estas tablas, según los distintos autores, pueden variar en algunos elementos, aunque no en los esenciales

Pero, en lo general se encontrarán los siguientes elementos:

El parámetro ENTRE GRUPOS, que ya lo explicamos anteriormente. También encontraremos el parámetro DENTRO DE GRUPOS.

DF o en algunos casos GI. Son los grados de libertad, en esta columna figurarán los grados de libertad de cada fuente de variación.

SUMA DE CUADRADOS. En esta columna se mostrará el valor de las sumas cuadráticas correspondientes a cada variación.

CUADRADOS MEDIOS. En esta columna se mostrarán los cuadrados medios correspondientes a cada fuente de variación.

RAZÓN F. En esta columna se muestra el valor del cociente entre los cuadrados medios entre y dentro de grupos. Este cociente es la F de Snedecor experimental.

VALOR-P. En esta columna se indica cuál es la probabilidad de encontrar una F como la observada si no hubiera diferencias significativas. Si esta probabilidad es menor del nivel de significación (α), establecido para resolver el contraste, concluiremos que la probabilidad es demasiado pequeña para considerarla debida al azar y que el cuadrado medio de grupos es mayor que el cuadrado medio dentro de grupos debido a que entre las medidas existen diferencias significativas. Si el nivel de significación lo hemos fijado en 0,05 como es habitual, aceptaremos que existen diferencias significativas entre las medias cuando F. PROB sea menor que 0,05. Si el análisis de la varianza no es significativo, no podemos rechazar la hipótesis nula y, por lo tanto, no tenemos evidencia de que existan diferencias entre las medias, con lo cual habremos concluido el estudio. El análisis de varianza únicamente nos informa de si existen o no diferencias significativas entre las medias, pero no nos dice cuáles son. Si el análisis de varianza es significativo, debemos proceder a la realización de pruebas de comparación múltiple, a fin de dilucidar entre qué medidas existen diferencias significativas. ^[16]

4.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VARIANZA

A partir del análisis de varianza se pretende determinar las diferencias entre resultados obtenidos con el software elaborado y el software PAX-it, para lo cual se realizarán tres análisis de varianza: para el porcentaje de ferrita, el porcentaje de perlita y el tamaño de grano, esto lo realizaremos con los paquetes estadísticos SPSS y STATGRAPHICS Centurion. Cabe destacar que el paquete estadístico STATGRAPHICS emite un informe detallado del análisis de varianza que facilita la interpretación de resultados.

Para el ingreso de datos en estos paquetes se utilizarán las tablas 4.17, 4.18 y 4.19, en las cuales constan los resultados de los programas a comparar.

Tabla 4.17 Datos de porcentaje de ferrita

PORCENTAJE DE FERRITA		
PROBETA	SOFTWARE ELABORADO	PAX-it
1	97,276	96,69
2	94,302	92,94
3	96,756	92,13
4	97,584	90,58

Tabla 4.18 Datos de porcentaje de perlita

PORCENTAJE DE PERLITA		
PROBETA	SOFTWARE ELABORADO	PAX-it
1	2,724	5,31
2	5,698	7,06
3	3,244	7,87
4	2,415	9,42

Tabla 4.19 Datos de tamaño de grano

TAMAÑO DE GRANO		
PROBETA	SOFTWARE ELABORADO	PAX-it
1	9,41	10,34
2	9,66	9,83
3	9,73	9,64
4	9,73	9,96

4.5.1 TABLA ANOVA PARA PORCENTAJE DE FERRITA

Para el primer caso, la variable dependiente es el porcentaje de ferrita; la variable independiente o factor es el software empleado para la determinación de este porcentaje: software propio y PAX-it.

La prueba de hipótesis a realizarse es:

$$H_0: \mu_{\text{PORCENTAJE DE FERRITA-SOFTWARE PROPIO}} = \mu_{\text{PORCENTAJE DE FERRITA-PAX-it}} \quad \alpha = 0,05$$

$$H_1: \mu_{\text{PORCENTAJE DE FERRITA-SOFTWARE PROPIO}} \neq \mu_{\text{PORCENTAJE DE FERRITA-PAX-it}}$$

El análisis de varianza en SPSS se muestra en la tabla 4.20.

Tabla 4.20 ANOVA para porcentaje de ferrita

	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	VALOR P
ENTRE GRUPOS	23,045	1	23,045	5,145	0,064
DENTRO DE GRUPOS	26,876	6	4,479		
TOTAL	49,922	7			

En la tabla 4.20 se muestran los resultados del análisis entre el porcentaje de ferrita y el software utilizado para obtener estos porcentajes. En este caso hay dos grupos, o lo que es lo mismo dos niveles, correspondientes a los dos softwares. Se puede observar que el cociente entre los cuadrados medios *entre* y *dentro de grupos* es 5,145 que es la F experimental, y la probabilidad de encontrar un valor de F mayor que F es 0,064 que es mayor que 0,05. No podemos rechazar la hipótesis nula, y por lo tanto no se tiene evidencia suficiente para afirmar que el porcentaje de ferrita es distinta en los diferentes softwares.

En el paquete STATGRAPHICS Centurion se muestra resultado en la tabla 4.21:

Tabla 4.21 ANOVA para porcentaje de ferrita

	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	VALOR P
ENTRE GRUPOS	23,0453	1	23,0453	5,14	0,0638
DENTRO DE GRUPOS	26,8764	6	4,4794		
TOTAL	49,9217	7			

El informe proporcionado por el paquete STATGRAPHICS Centurion es:

La tabla ANOVA descompone la varianza de Porcentaje de ferrita en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón F, que en este caso es igual a 5,14, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la razón F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Porcentaje de ferrita entre un nivel de Software empleado y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

4.5.2 TABLA ANOVA PARA PORCENTAJE DE PERLITA

Para el segundo caso, la variable dependiente es el porcentaje de perlita; la variable dependiente o factor es la misma del caso anterior, el software empleado para la determinación de este porcentaje: software propio y PAX-it.

La prueba de hipótesis es:

$$H_0: \mu_{\text{PORCENTAJE DE PERLITA-SOFTWARE PROPIO}} = \mu_{\text{PORCENTAJE DE PERLITA-PAX-it}} \quad \alpha = 0,05$$

$$H_1: \mu_{\text{PORCENTAJE DE PERLITA-SOFTWARE PROPIO}} \neq \mu_{\text{PORCENTAJE DE PERLITA-PAX-it}}$$

El análisis de varianza en SPSS para el porcentaje de perlita se muestra en la tabla 4.22.

Tabla 4.22 ANOVA para porcentaje de perlita

	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	VALOR P
ENTRE GRUPOS	30,338	1	30,338	11,775	0,014
DENTRO DE GRUPOS	15,459	6	2,576		
TOTAL	45,797	7			

En la tabla 4.22 se muestran los resultados del análisis entre el porcentaje de ferrita y el software utilizado para obtener estos porcentajes. Se puede observar que el cociente entre los cuadrados medios *entre* y *dentro de grupos* es 11,775 que es la F experimental, y la probabilidad de encontrar un valor de F mayor que F_{es} 0,14 que es menor que 0,05. De manera que rechazamos la hipótesis nula, y por lo tanto tenemos evidencia suficiente para afirmar que el porcentaje de ferrita es distinta en los diferentes softwares. Esto se debe porque para determinar el porcentaje de ferrita y perlita hay que manipular el software Pax-it estableciendo su porcentaje por inspección visual de la micrografía y a criterio del usuario.

En el paquete STATGRAPHICS Centurion se muestra resultado para el porcentaje de perlita, en la tabla 4.23

Tabla 4.23 ANOVA para Porcentaje de perlita

	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	VALOR P
ENTRE GRUPOS	30,3382	1	30,3382	11,78	0,0139
DENTRO DE GRUPOS	15,4586	6	2,57643		
TOTAL	45,7968	7			

Interpretación de STATGRAPHICS Centurion:

La tabla ANOVA descompone la varianza de Porcentaje de perlita en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón F, que en este caso es igual a 11,7753, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro de grupos. Puesto que el valor P de la prueba F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Porcentaje de perlita entre un nivel de Software empleado y otro, con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, seleccione Pruebas de Múltiples Rangos, de la lista de Opciones Tabulares.

4.5.3 TABLA ANOVA PARA TAMAÑO DE GRANO

Por último, en el análisis de varianza para el tamaño de grano se postula la prueba de hipótesis a continuación:

$$H_0: \mu_{\text{TAMAÑO DE GRANO-SOFTWARE PROPIO}} = \mu_{\text{TAMAÑO DE GRANO-PAX-it}} \quad \alpha = 0,05$$

$$H_1: \mu_{\text{TAMAÑO DE GRANO-SOFTWARE PROPIO}} \neq \mu_{\text{TAMAÑO DE GRANO-PAX-it}}$$

La tabla ANOVA para el tamaño de grano, se presenta en la tabla 4.24.

Tabla 4.24 ANOVA Para tamaño de grano

	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	VALOR P
ENTRE GRUPOS	0,192	1	0,192	3,476	0,112
DENTRO DE GRUPOS	0,332	6	0,055		
TOTAL	0,524	7			

La tabla 4.24 se muestran los resultados del análisis entre el porcentaje de ferrita y el software utilizado para obtener estos porcentajes. Se puede observar que el cociente entre los cuadrados medios *entre y dentro de grupos* es 3,476 que es la F experimental, y la probabilidad de encontrar un valor de F mayor que Fes 0,112 que es mayor que 0,05. No podemos rechazar la hipótesis nula, y por lo tanto no tenemos evidencia suficiente para afirmar que el porcentaje de ferrita es distinta en los diferentes softwares.

Análisis realizado en el paquete STATGRAPHICS Centurion se muestra resultado en la tabla 4.25.

Tabla 4.25 ANOVA para Tamaño de grano

	SUMA DE CUADRADOS	GL	CUADRADOS MEDIOS	F	VALOR P
ENTRE GRUPOS	0,1922	1	0,1922	3,48	0,1115
DENTRO DE GRUPOS	0,33175	6	0,0552917		
TOTAL	0,52395	7			

Interpretación STATGRAPHICS Centurion:

La tabla ANOVA descompone la varianza de Tamaño de grano en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón F, que en este caso es igual a 3,476, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor P de la razón F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Tamaño de grano entre un nivel de Software empleado y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

4.5.4 TABLA FINAL DE RESULTADOS

Una vez realizado el análisis de varianza se elabora la tabla 4.26 la cual da lugar a la verificación de hipótesis plantadas para determinar las diferencias de resultados entre los software empleados (PAX-it y software elaborado).

Tabla 4.26 Verificación de hipótesis plateadas

VARIABLE	P VALOR	RESULTADO
Tamaño de grano	P valor > 0,05	Se acepta Ho
Porcentaje de ferrita	P valor > 0,05	Se acepta Ho
Porcentaje de perlita	P valor < 0,05	Se rechaza Ho

Por tanto, se puede concluir que las diferencias entre los resultados para tamaño de grano y el porcentaje de ferrita obtenidos con el software elaborado y el PAX-it no son estadísticamente significativas a un nivel del 95,0% de confianza.

En cambio, para el porcentaje de perlita se observa que sí existen diferencias significativas, esto se debe a la manipulación de la segmentación o distribución de fases componentes que se realiza en el software PAX-it para determinar el porcentaje de fases, dicha manipulación queda a criterio del usuario del software por lo que los resultados pueden variar. De esta manera se puede concluir que los resultados del software elaborado son confiables porque no presentan una diferencia significativa con los resultados del PAX-it.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El resultado de tamaño de grano obtenido por el software elaborado es verificable, pues está basado en la norma europea UNE 7-280-72 para la determinación del tamaño de grano; el porcentaje de error se encuentra en el intervalo de 0,7% a 9% lo que indica que los resultados son aceptables al compararlos con los resultados del PAX-it.

Una de las principales ventajas del software es que no requiere de manipulación alguna para la determinación de fases componentes (ferrita-perlita) tal y como ocurre con el software PAX-it, utilizado en el laboratorio, donde la segmentación o distribución de fases componentes queda a criterio del usuario.

Para el procesamiento de imágenes en el software elaborado no se requieren de cambios en el formato de imagen, pues se utiliza el formato de imagen predeterminado por el microscopio metalográfico (.jpg), lo que no ocurre con PAX-it, donde previamente se debe realizar un cambio de formato de imagen para el procesamiento de imágenes.

Al realizar el análisis estadístico de varianza para determinar las diferencias entre los resultados obtenidos entre el software elaborado y el PAX-it se observa que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del porcentaje de ferrita obtenida por el software elaborado y la media del porcentaje de ferrita obtenida por el PAX-it, a un nivel del 95,0% de confianza, lo que sucede también con el tamaño de grano. Cabe señalar, que si bien es cierto, el análisis de varianza para el porcentaje de perlita nos dice que existen diferencias significativas entre los resultados de ambos softwares, esto se debe a la manipulación de la segmentación o distribución de fases componentes,

mencionado anteriormente. Por lo que se concluye que los resultados obtenidos por software elaborado son válidos y confiables.

El software elaborado, al ofrecer dos rangos para porcentaje de carbono para la realización del análisis metalográfico, permite tener una mayor confiabilidad de los resultados, pues dependiendo de la muestra metalográfica se puede establecer visualmente a qué rango pertenece, si se observa que la muestra presenta mayor cantidad de perlita, pertenecerá al rango de entre 0,15% a 0,25% de carbono o si se observa que la muestra presenta menor cantidad de perlita pertenecerá al rango de menos del 15% de carbono. Lo que no ocurre con el PAX-it donde los resultados obtenidos son sólo correctos en aceros menores al 15% de carbono.

El software elaborado tiene la cualidad de que, por estar escrito en un lenguaje de programación de código abierto, puede ser instalado en cualquier computador con cualquier sistema operativo, las veces que se desee. Igualmente, por estar en código abierto, puede ser manipulado para su mejoramiento.

La interfaz gráfica del software elaborado es muy didáctica y de fácil manejo.

El software de procesamiento de imágenes ayudará a la optimización de tiempo en el análisis metalográfico para la determinación de tamaño de grano y porcentaje de fases.

El software ofrece funciones adicionales en la manipulación de imágenes, pues una vez ejecutado el mismo, se tiene una ventana con las imágenes procesadas en escala de grises que permite realizar acercamientos para determinar defectos o inclusiones en la muestra metalográfica analizada.

5.2 RECOMENDACIONES

Procurar que las imágenes de las micrografías sean lo más nítidas posible, debido a que el software de procesamiento de imágenes digitaliza una sección de la micrografía para realizar el conteo del número de regiones cerradas dentro del número de regiones grises. Con el número de regiones totales y la tabla III de la norma Española UNE 7-280-72, se determina el tamaño de grano haciendo uso de la rangos para cada tamaño de grano G.

Para la instalación en el laboratorio de metalografía y para el buen uso del software de procesamiento de imágenes se deben seguir los pasos indicados en el “MANUAL DE USUARIO PARA SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MEDIANTE SOFTWARE LIBRE PYTHON PARA EL ANÁLISIS METALOGRÁFICO EN ACEROS DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO”.

Tomar en cuenta que las bibliotecas a instalar deben tener compatibilidad con Python 2.7, caso contrario se presentarán problemas de ejecución en la interfaz gráfica del software de procesamiento de imágenes.

Una manera adicional para determinar el tamaño de grano es utilizando cualquier procedimiento de la norma ASTM E-122 (método planímetro, intersección y comparación), se determina el tamaño de grano y luego se comparan y verifican los resultados con el software de procesamiento de imágenes.

Si se obtiene un porcentaje de error superior al 10%, se debe realizar el proceso una vez más y para descartar el error hay que cambiar de micrografía a una que deberá tener una de mayor nitidez, así los resultados obtenidos serán los correctos.

Por lo general el tamaño de grano “G” en aceros de bajo contenido de carbono varía entre 9 y 10, todo depende del porcentaje de carbono que presente la muestra metalográfica analizada.

Al realizar el análisis de varianza ANOVA, es preferible utilizar el paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion, ya que este emite un informe detallado del cumplimiento de la hipótesis planteada e indica si los resultados son confiables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] DUFFUS, A., (2010), Técnicas de procesamiento digital de imágenes aplicadas al análisis de microestructuras en muestras de aceros
- [2] ASKELAND D., (1988), “Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Ed., International Thomson, México, 3ra Edición.
- [3] Folleto de ciencia de materiales EPN, 2011
- [4] SYDNEY H. Avene. (1998), Introducción a la metalurgia física, Ed McGraw-Hill, México, Segunda edición.
- [5] RUIZ, Rodrigo, (2012), Tratamientos térmicos.
- [6] CALLISTER W. (1992), “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales”, Ed., Reverté, Barcelona, 1ra Edición.
- [7] H. K. D. H. Bhadeshia. The bainite transformation: unresolved issues. Material Science and Engineering A. Vol. 273.
- [8] PÉREZ, M; HERNANDEZ ,H., 2011, Aplicación para procesamiento de imágenes metalográficas desde pme3.
- [9] R. Wainschenker; J. Massa, P. Tristan. ETAPAS Del PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES. Guía informativa área Procesamiento de Señales. 2011.
- [10] SEIRO, D. (2012). Resumen de la Norma ASTM E112.
- [11] Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM Standards, Designation: E112 – 12

- [12] <http://eafasainz12.blogspot.com/2012/12/el-acero-el-acero-es-una-aleacion-de.html>

- [13] Lute Juan, 2011, metals no ferros <http://juanlutecind1.blogspot.com/p/tema-6-metales-ferrosos.html>

- [14] Determinación del tamaño de grano en aceros, Norma española UNE 7-280-72.

- [15] <http://www.python.org/>

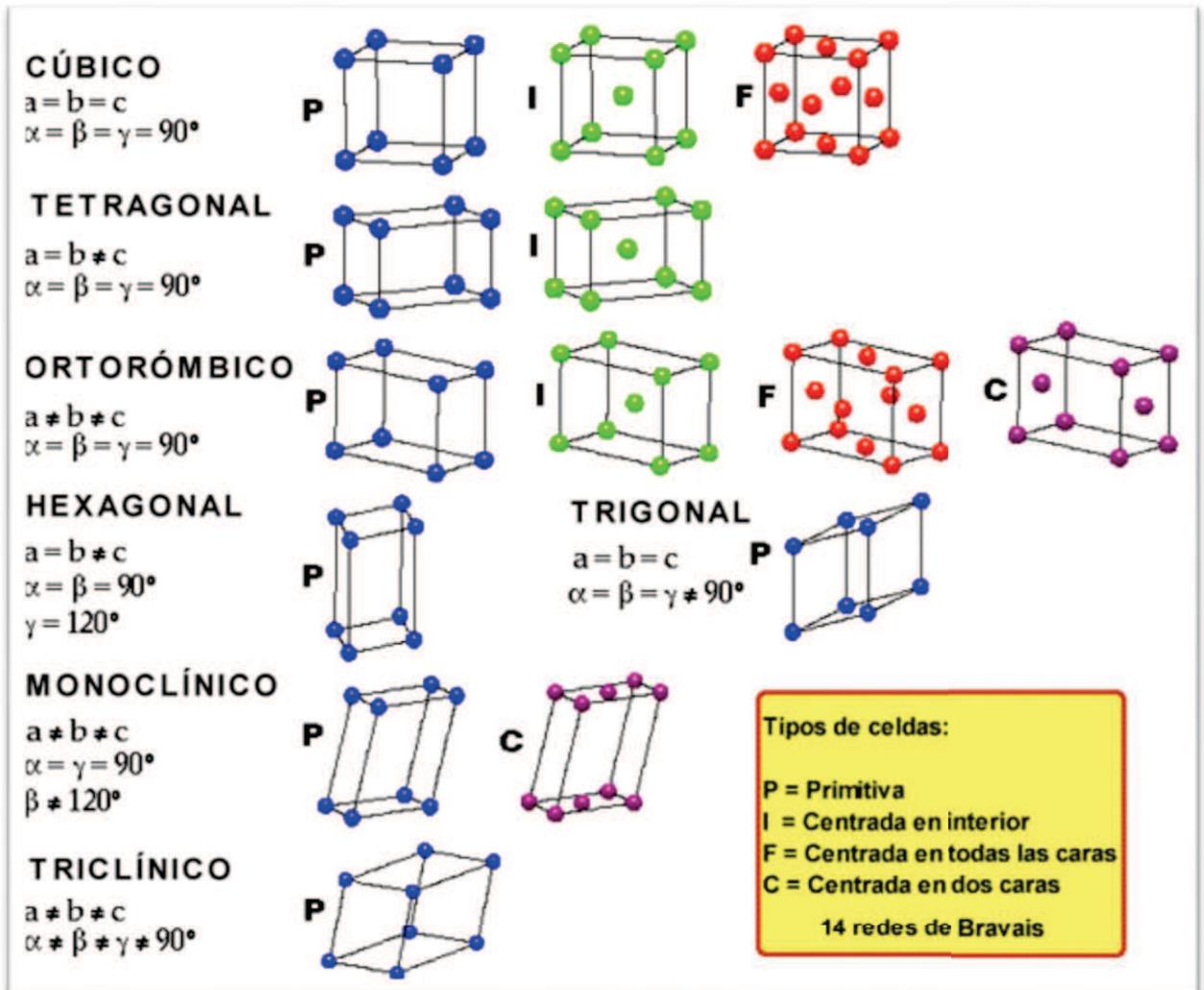
- [16] CACERES, R. (1995), Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS, Madrid 1ra Edición, pag. 8, 12

- [17] SÁNCHEZ, F. (2012), La informática y su importancia en la actualidad, <http://informacionyimportanciadeinformatica.blogspot.com/>

- [18] BRAVO, Diego (2006), Ventajas y desventajas, comparación de lenguajes Java y C++ http://www.limadata.com/doc/ventajas_c.pdf.

ANEXOS

ANEXO 1



REDES CRISTALINAS EXISTENTES

ANEXO 2

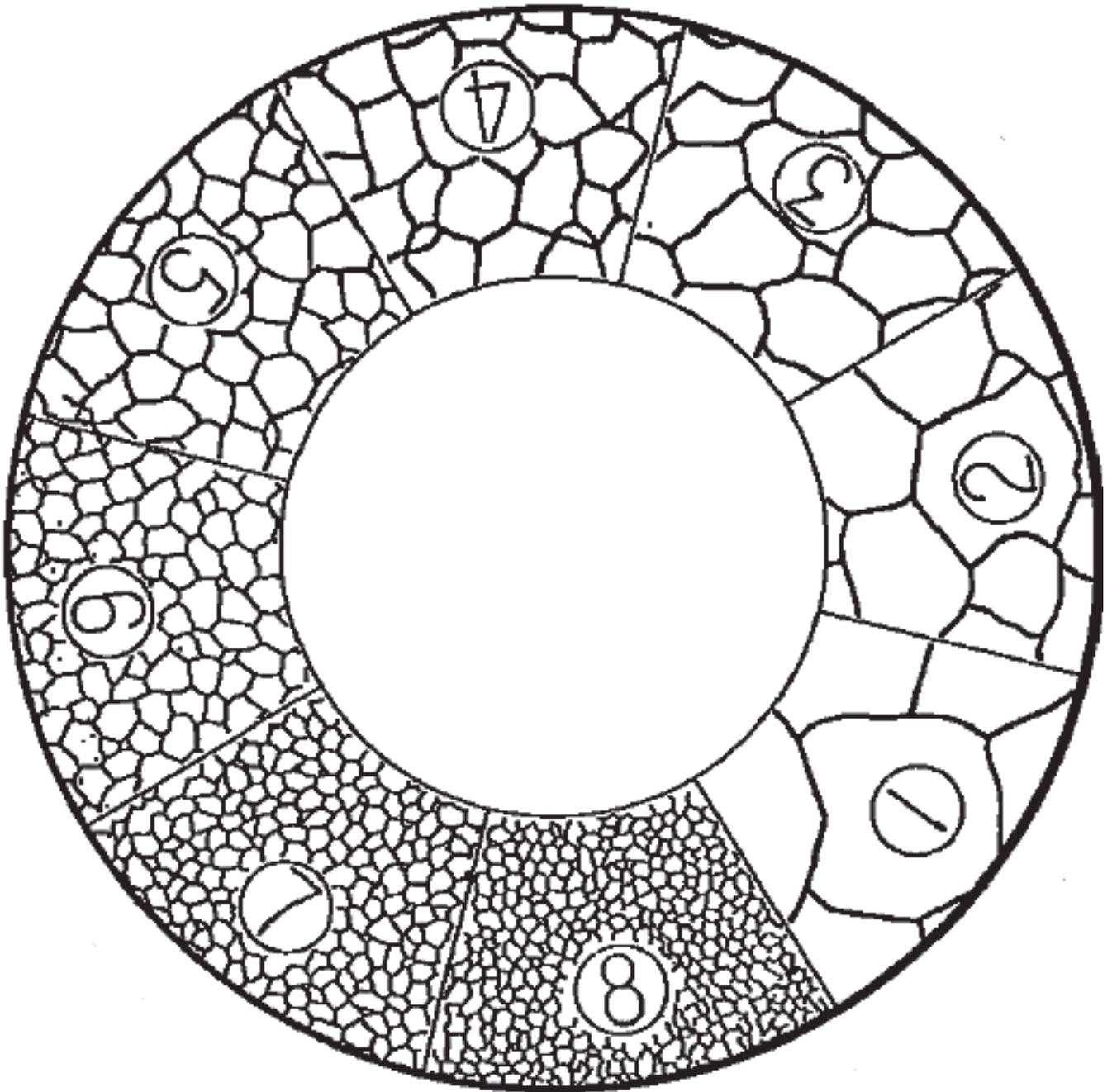
SOLUCIONES PARA REALIZAR EL ATAQUE QUÍMICO

METAL	SOLUCIÓN QUÍMICA	COMENTARIOS
Aluminio	60ml H ₂ SO ₄ 30ml H ₃ PO ₄ 10ml HNO ₃	Usar a 100°C de 2 a 5 min
	70ml H ₃ PO ₄ 15ml ác. Acético 15ml Agua	Usar de 100°C a 120°C por 2 a 6 min
Cobre	6ml HNO ₃ 65ml ác. Acético 27ml H ₃ PO ₄	Pulir hasta lija 600 y sumergir a 60°C por 1 min
	80ml H ₂ SO ₄ 20ml HNO ₃ 1ml HCl 55-60g CrO ₃ 200ml Agua	Usar de 20°C a 40°C por 1 a 3 min. Eficaz con aleaciones también.
Hierros	70ml H ₂ O ₂ (30%)	Usar de 15°C a 25°C
Hierro, aleaciones con bajo contenido de Carbono	30ml HNO ₃ 70ml HF 300ml agua	Usar a 60°C
	25g ác. Oxálico 10ml H ₂ O ₂ 1gota de H ₂ SO ₄ 1000ml de agua	Pulir hasta lija 600 y sumergir a 20°C
	3 partes de H ₃ PO ₄ 1 parte de H ₂ SO ₄ 1 parte de HNO ₃	Usar a 85°C
Aceros al carbono	90ml H ₂ O ₂ (30%) 10ml Agua 15ml H ₂ SO ₄	Usar de 25°C de 2 a 5 min
Acero inoxidable	Agregar por peso 30% HCL 40% H ₂ SO ₄ 5.5% tetracloruro de titanio 24.5% Agua	Usar por inmersión de 70°C a 80°C de 2 a 5 min

Aceros	<p>Solución A</p> <p>3 partes de H₂O₂ (30%) 10 partes agua 1 parte HF</p>	<p>Concentraciones mayores a 0,3% C: Pulir hasta lija 150, sumergir en solución A de 15 a 25 segundos, lavar con agua, limpiar con solución B en algodón, lavar con agua y secar.</p>
	<p>Solución B</p> <p>1 parte H₃PO₄ 15 partes agua</p>	<p>Concentraciones entre 0.15 y 0.3% C: Pulir hasta lija 320 y sumergir en solución A de 12 a 18 segundos, luego realizar proceso de limpieza indicado anteriormente.</p> <p>Concentraciones menores a 0.15% C: Pulir hasta lija 600 Sumergir en solución A de 3 a 5 segundos, luego realizar proceso de limpieza indicado anteriormente.</p>

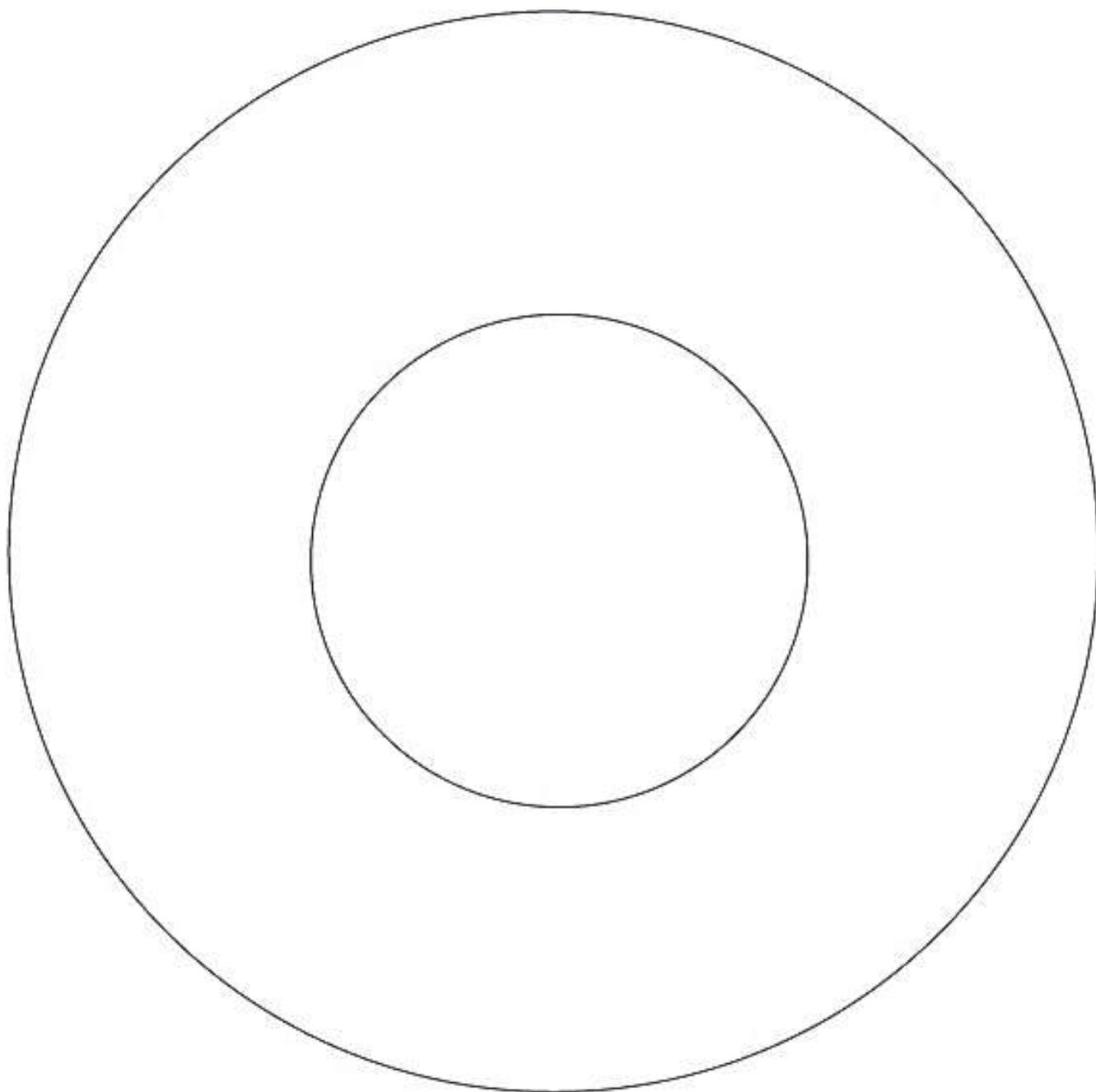
ANEXO 3

PLANTILLA COMPARATIVA PARA DETERMINAR TAMAÑO DE GRANO
PARA PROCEDIMIENTO DE COMPARACIÓN NORMA ASTM E-122.



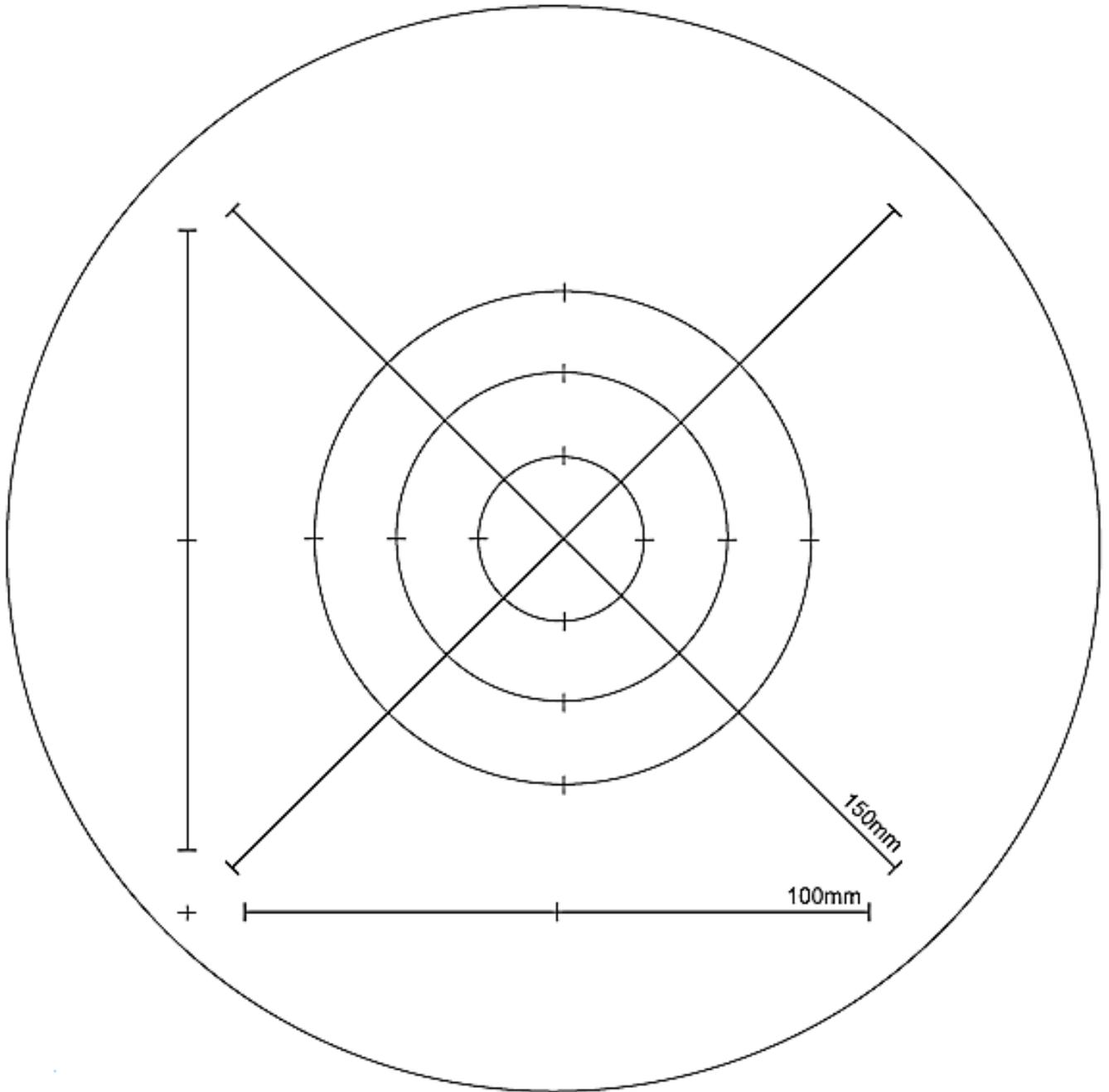
ANEXO 4

PLANTILLA DE 175 MM DE DIÁMETRO EXTERIOR PARA PROCEDIMIENTO PLANIMÉTRICO NORMA ASTM E-122.



ANEXO 5

PLANTILLA PARA MÉTODO DE INTERSECCIÓN NORMA ASTM E-112



ANEXO 6

TABLA PARA DETERMINAR TAMAÑO DE GRANO

 E 112

TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		\bar{T} Mean Intercept		\bar{N}_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

ANEXO 7

TABLA III, VALORES DE ÍNDICES DE TAMAÑO DE GRANO G

Valores de los índices de tamaño de grano G	m			Diámetro medio de un grano mm	Area media de un grano mm ²	Número medio de granos por mm ³	Longitud media de intersección (método Heyn) mm
	Valor nominal	Valores límite					
		De (excluido)	Hasta (incluido)				
— 7	0,0625	0,046	0,092	4	16	0,016	3,54
— 6	0,125	0,092	0,185	2,828	8	0,044	2,51
— 5	0,25	0,185	0,37	2	4	0,125	1,78
— 4	0,50	0,37	0,75	1,414	2	0,353	1,25
— 3	1	0,75	1,5	1	1	1,000	0,888
— 2	2	1,5	3	0,707	0,5	2,83	0,627
— 1	4	3	6	0,500	0,25	8,00	0,444
0	8	6	12	0,353	0,125	22,7	0,313
1	16	12	24	0,250	0,0625	64,1	0,222
2	32	24	48	0,176	0,0312	183	0,156
3	64	48	96	0,125	0,0156	512	0,111
4	128	96	192	0,0883	0,00781	1450	0,0784
5	256	192	384	0,0612	0,00390	4350	0,0543
6	512	384	768	0,0441	0,00195	11700	0,0391
7	1024	768	1536	0,0306	0,00098	34800	0,0271
8	2048	1536	3072	0,0224	0,00049	88500	0,0198
9	4096	3072	6144	0,0153	0,000244	279000	0,0135
10	8192	6144	12288	0,0112	0,000122	714000	0,00994
11	16384	12288	24576	0,0076	0,000061	2,3 · 10 ⁶	0,0067
12	32768	24576	49152	0,0056	0,000030	5,7 · 10 ⁶	0,0049
13	65536	49152	98304	0,0038	0,000015	18 · 10 ⁶	0,0033
14	131072	98304	196608	0,0028	0,0000075	46 · 10 ⁶	0,0024
15	262144	196608	393216	0,0019	0,0000037	150 · 10 ⁶	0,0016
16	524288	393216	786432	0,0014	0,0000019	370 · 10 ⁶	0,0012
17	1048576	786432	1572864	0,0009	0,00000095	1400 · 10 ⁶	0,0007

ANEXO 8

CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-
# generated by wxGlade 0.6.3 on Mon May 17 03:29:38 2010

import wx
import os
import xlwt
from tam_grano import *
from labelConnectCom import *
from PIL import Image
# begin wxGlade: extracode
global resultados

resultados = ''
# end wxGlade

class Principal(wx.Frame):
    def __init__(self, *args, **kwargs):
        # begin wxGlade: Principal.__init__
        kwargs["style"] = wx.SYSTEM_MENU | wx.CAPTION |
wx.CLOSE_BOX
        kwargs["style"] = wx.DEFAULT_FRAME_STYLE
        wx.Frame.__init__(self, *args, **kwargs)
        self.panel_1 = wx.Panel(self, -1)
        self.PhotoMaxSize = 300
        # Menu Bar
        self.PpalMenubar = wx.MenuBar()
        # Menu Archivo
        self.MenuArchivo = wx.Menu()
```

```

        self.Nuevo = wx.MenuItem(self.MenuArchivo,
wx.NewId(), "Nuevo", "", wx.ITEM_NORMAL)
        img = wx.Image('nuevo.png', wx.BITMAP_TYPE_ANY)
        self.Nuevo.SetBitmap(wx.BitmapFromImage(img))
        self.MenuArchivo.AppendItem(self.Nuevo)
        self.Archivador = wx.MenuItem(self.MenuArchivo,
wx.NewId(), "Abrir Archivador", "", wx.ITEM_NORMAL)
        img = wx.Image('archivador.png', wx.BITMAP_TYPE_ANY)
        self.Archivador.SetBitmap(wx.BitmapFromImage(img))
        self.MenuArchivo.AppendItem(self.Archivador)
        self.MenuArchivo.AppendSeparator()
        self.Importar = wx.MenuItem(self.MenuArchivo,
wx.NewId(), "Importar Imagen...", "", wx.ITEM_NORMAL)
        img = wx.Image('open.png', wx.BITMAP_TYPE_ANY)
        self.Importar.SetBitmap(wx.BitmapFromImage(img))
        self.MenuArchivo.AppendItem(self.Importar)
        self.MenuArchivo.AppendSeparator()
        self.Cerrar = wx.MenuItem(self.MenuArchivo,
wx.NewId(), "Salir", "", wx.ITEM_NORMAL)
        self.MenuArchivo.AppendItem(self.Cerrar)
        self.PpalMenubar.Append(self.MenuArchivo, "Archivo")
# Fin Menu Archivo

# Menu Ver
        self.MenuVer = wx.Menu()
        Tamano = wx.Menu()
        self.Primeros = wx.MenuItem(self.MenuVer, wx.NewId(),
"1x", "", wx.ITEM_RADIO)
        Tamano.AppendItem(self.Primeros)
        self.Segundos = wx.MenuItem(self.MenuVer, wx.NewId(),
"2x", "", wx.ITEM_RADIO)
        Tamano.AppendItem(self.Segundos)

```

```

        self.Tercero = wx.MenuItem(self.MenuVer, wx.NewId(),
"3x", "", wx.ITEM_RADIO)
        Tamano.AppendItem(self.Tercero)
        self.Cuarto = wx.MenuItem(self.MenuVer, wx.NewId(),
"4x", "", wx.ITEM_RADIO)
        Tamano.AppendItem(self.Cuarto)
        self.MenuVer.AppendMenu(wx.NewId(), "Aumento", Tamano)
        self.PpalMenubar.Append(self.MenuVer, "Ver")

# Fin Menu Ver

# Menu Imagen
        self.MenuImagen = wx.Menu()
        self.Gris = wx.MenuItem(self.MenuImagen, wx.NewId(),
"Imagen Gris", "", wx.ITEM_NORMAL)
        self.MenuImagen.AppendItem(self.Gris)
        Rotar = wx.Menu()
        self.PrimerRot = wx.MenuItem(self.MenuVer,
wx.NewId(), "90 grados", "", wx.ITEM_RADIO)
        Rotar.AppendItem(self.PrimerRot)
        self.SegundoRot = wx.MenuItem(self.MenuVer,
wx.NewId(), "180 grados", "", wx.ITEM_RADIO)
        Rotar.AppendItem(self.SegundoRot)
        self.TerceroRot = wx.MenuItem(self.MenuVer,
wx.NewId(), "270 grados", "", wx.ITEM_RADIO)
        Rotar.AppendItem(self.TerceroRot)
        self.MenuImagen.AppendMenu(wx.NewId(), "Rotar", Rotar)

        self.PpalMenubar.Append(self.MenuImagen, "Imagen")

        self.SetMenuBar(self.PpalMenubar)

# Menu Imagen

# Menu Manual

```

```

self.MenuAyuda = wx.Menu()
self.Manual = wx.MenuItem(self.MenuAyuda, wx.NewId(),
"Manual de Usuario", "", wx.ITEM_NORMAL)
#img = wx.Image('man.png', wx.BITMAP_TYPE_ANY)
#self.Manual.SetBitmap(wx.BitmapFromImage(img))
#self.MenuAyuda.AppendItem(self.Manual)

self.MenuAyuda.AppendItem(self.Manual)
self.PpalMenubar.Append(self.MenuAyuda, "Ayuda ")

self.SetMenuBar(self.PpalMenubar)

#Menu Manual

# Menu Bar end

self.PpalEstatusBar = self.CreateStatusBar(2, 0)

# Tool Bar
self.Principal_toolbar = wx.ToolBar(self, -1,
style=wx.TB_HORIZONTAL|wx.TB_3DBUTTONS)
self.SetToolBar(self.Principal_toolbar)
self.Principal_toolbar.AddLabelTool(1, "Nuevo",
wx.Bitmap("nuevo.png", wx.BITMAP_TYPE_PNG), wx.NullBitmap,
wx.ITEM_NORMAL, "Nuevo", "")
self.Principal_toolbar.AddLabelTool(2, "Abrir
Archivador", wx.Bitmap("archivador.png", wx.BITMAP_TYPE_PNG),
wx.NullBitmap, wx.ITEM_NORMAL, "Abrir Archivador", "")
self.Principal_toolbar.AddLabelTool(3, "Importar
Imagen", wx.Bitmap("open.png", wx.BITMAP_TYPE_ANY),
wx.NullBitmap, wx.ITEM_NORMAL, "Importar Imagen", "")

```

```

        self.Principal_toolbar.AddLabelTool(17, "Exportar a
Excel", wx.Bitmap("excel.png", wx.BITMAP_TYPE_ANY),
wx.NullBitmap, wx.ITEM_NORMAL, "Exportar a Excel", "")
        self.Principal_toolbar.AddLabelTool(4, "Salir",
wx.Bitmap("salir.png", wx.BITMAP_TYPE_ANY), wx.NullBitmap,
wx.ITEM_NORMAL, "Salir", "")
        self.Principal_toolbar.AddLabelTool(15, u"Aceros<
0,15% ", wx.Bitmap("carbono15.png", wx.BITMAP_TYPE_ANY),
wx.NullBitmap, wx.ITEM_NORMAL, u"Recuerde primero seleccionar
la MUESTRA", "")
        self.Principal_toolbar.AddLabelTool(16, u"0,15<
Aceros <0,25 %C", wx.Bitmap("carbono25.png",
wx.BITMAP_TYPE_ANY), wx.NullBitmap, wx.ITEM_NORMAL,
u"Recuerde primero seleccionar la MUESTRA", "")
        # Tool Bar end

# Imagen
        img = wx.Image('sup.bmp', wx.BITMAP_TYPE_ANY)
        img = img.Scale(250,250)
        self.imageCtrl = wx.StaticBitmap(self,
wx.ID_ANY,wx.BitmapFromImage(img))

        img = wx.Image('gris.png', wx.BITMAP_TYPE_ANY)
        img = img.Scale(250,250)
        self.imageCtrl_1 = wx.StaticBitmap(self,
wx.ID_ANY,wx.BitmapFromImage(img))

        self.label = wx.StaticText(self, wx.ID_ANY,
("MUESTRA"))
        self.label_muestra = wx.StaticText(self, wx.ID_ANY,
(""))

```

```

#Imagen End
    self.label_Resultados = wx.StaticText(self,
wx.ID_ANY, ("\n\n      Resultados:\n"))
    self.__set_properties()
    self.__do_layout()

    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.OnCerrar, id=4)
    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.OnNuevo, id=1)
    self.Bind(wx.EVT_MENU, self.OnNuevo, self.Nuevo)
    self.Bind(wx.EVT_MENU, self.OnRotarL,
self.PrimerRot)
    self.Bind(wx.EVT_MENU, self.OnCerrar, self.Cerrar)
    self.Bind(wx.EVT_MENU, self.OnNuevo_img1,
self.Importar)
    self.Bind(wx.EVT_MENU, self.OnNuevo_img1, id=3)
    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.opendir, self.Archivador)
    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.opendir, id=2)
    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.OnTamano, id=15)
    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.OnLabelConnect, id=16)
    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.OnExportarExcel, id=17)
    self.Bind(wx.EVT_TOOL, self.OnManual, self.Manual)
    self.imageCtrl_1.Bind(wx.EVT_LEFT_UP,
self.OnImageEvents_1)
    # end wxGlade

def __set_properties(self):
    # begin wxGlade: Principal.__set_properties
    self.SetTitle(u"PROCESAMIENTO DE IMÁGENES")
    self.SetSize((950,600))
    self.SetBackgroundColour(wx.Colour(253, 249, 255))
    self.PpalEstatusBar.SetStatusWidths([2,0])

    # statusbar fields

```

```

PpalEstatusBar_fields = ["Listo", ""]
for i in range(len(PpalEstatusBar_fields)):

self.PpalEstatusBar.SetStatusText(PpalEstatusBar_fields[i],
i)

    self.Principal_toolbar.Realize()
    self.label.SetForegroundColour(wx.Colour(30, 10, 0))
    self.label.SetFont(wx.Font(14, wx.MODERN, wx.NORMAL,
wx.BOLD, 0, " Verdana"))
    self.label_muestra.SetForegroundColour(wx.Colour(30,
10, 0))
    self.label_muestra.SetFont(wx.Font(14, wx.MODERN,
wx.NORMAL, wx.BOLD, 0, "Verdana"))
    # end wxGlade

def __do_layout(self):
    # begin wxGlade: Principal.__do_layout
    sizer_5 = wx.FlexGridSizer(wx.VERTICAL)
    grid_sizer_6 = wx.GridSizer(1, 2, 50, 50)
    grid_sizer_5 = wx.GridSizer(1, 3, 50, 50)
    grid_sizer_4 = wx.GridSizer(1, 3, 50, 50)
    grid_sizer_4.Add(self.label_muestra, 0, wx.EXPAND ,
0)

    grid_sizer_4.Add(self.label, 0,
wx.ALIGN_CENTER_HORIZONTAL , 0)
    grid_sizer_5.Add(self.imageCtrl, 0,
wx.ALIGN_CENTER_HORIZONTAL | wx.ALIGN_CENTER_VERTICAL, 50)
    grid_sizer_5.Add(self.imageCtrl_1, 0,
wx.ALIGN_CENTER_HORIZONTAL | wx.ALIGN_CENTER_VERTICAL, 50)
    sizer_5.Add(grid_sizer_4, 1, wx.EXPAND, 0)
    sizer_5.Add(grid_sizer_5, 1, wx.EXPAND, 0)
    grid_sizer_6.Add(self.label_Resultados, 0,
wx.ALIGN_CENTER_VERTICAL, 0)

```

```
sizer_5.Add(grid_sizer_6, 1, wx.EXPAND, 0)
self.SetSizer(sizer_5)
self.Layout()
self.Centre()
# end wxGlade

def OnCerrar(self, event):
    dlg = wx.MessageDialog(self,
        "Do you really want to close this application?",
        "Confirm Exit", wx.OK|wx.CANCEL|wx.ICON_QUESTION)
    result = dlg.ShowModal()
    dlg.Destroy()
    if result == wx.ID_OK:
        self.Destroy()

def OnRotarL(self, event):
    print"sadasd"
    bmp = imag
    x = 0
    y = 0
    angle = 90
    jpg.Rotate(angle, (x,y), True, None)
    self.imageCtrl_1.SetBitmap(wx.BitmapFromImage(bmp))
    self.Refresh()

def OnNuevo(self, event):
    img = wx.Image('gris.png', wx.BITMAP_TYPE_ANY)
    img = img.Scale(250,250)
    self.imageCtrl_1.SetBitmap(wx.BitmapFromImage(img))
    self.Refresh()
```

```

def OnManual(self, event):
    archivo= os.popen('Manual.pdf')
    self.Refresh()

def OnNuevo_img1(self, event):
    global path
    dlg = wx.FileDialog(self, "Choose a file",
os.getcwd(), "", "*.jpg", wx.OPEN)
    if dlg.ShowModal() == wx.ID_OK:
        path = dlg.GetPath()
        mypath = os.path.basename(path)
        self.SetStatusText("You selected: %s" %
mypath)
        dlg.Destroy()
        self.onView()

def OnImageEvents_1(self,event):
    global image_to_use
    self.label_muestra.SetLabel(" Muestra Seleccionada")
    image_to_use = imagen1

def OnLabelConnect(self,event):
    global dir_path
    labelConnectCom(self,image_to_use,dir_path)
    print resultados

def OnTamano(self,event):
    global dir_path, resultados
    resultados = tam_grano(self,image_to_use,dir_path)
    print resultados

```

```

    def OnExportarExcel(self,event):
        style0 = xlwt.easyxf('font: name arial, colour blue,
bold on')
        wb = xlwt.Workbook()
        ws = wb.add_sheet('A Test
Sheet',cell_overwrite_ok=True)
        ws.write(1, 1, u'Porcentaje de Fases',style0)
        im = Image.open(dir_path + "/out_tamano.jpg")
        im = im.resize((400, 400), Image.ANTIALIAS)
        im.save(dir_path + "/tamano.bmp", "bmp")
        ws.insert_bitmap(dir_path + '/tamano.bmp', 5, 1)
        ws.write(1, 9, u'Tamaño de Grano',style0)
        im = Image.open(dir_path + "/out_label.jpg")
        im = im.resize((400, 400), Image.ANTIALIAS)
        im.save(dir_path + "/label.bmp", "bmp")
        ws.insert_bitmap(dir_path + '/label.bmp', 5, 9)
        wb.save(dir_path + '/example.xls')
        print resultados
        ws.write(30, 1, resultados,style0)
        dlg = wx.MessageDialog(self, u'Archivo en Excel
exportado con éxito', 'Exportado', wx.OK|wx.ICON_INFORMATION)
        dlg.ShowModal()
        dlg.Destroy()

def onView(self):
    global imagel,imag
    filepath = path
    imagel = Image.open(path)
    imag = wx.Image(filepath, wx.BITMAP_TYPE_ANY)
    imag = imag.Scale(250,250)
    self.imageCtrl_1.SetBitmap(wx.BitmapFromImage(imag))
    self.Refresh()

def opendir(self, event):

```

```
        global dir_path
        dlg = wx.DirDialog(self, "Choose a directory:",
style=wx.DD_DEFAULT_STYLE | wx.DD_NEW_DIR_BUTTON)
        if dlg.ShowModal() == wx.ID_OK:
            self.SetStatusText('You selected: %s\n' %
dlg.GetPath())
            dir_path = dlg.GetPath()
            print dir_path
            dlg.Destroy()

# end of class Principal

if __name__ == "__main__":
    app = wx.PySimpleApp(0)
    wx.InitAllImageHandlers()
    vntPrincipal = Principal(None, -1)
    app.SetTopWindow(vntPrincipal)
    vntPrincipal.Show()
    app.MainLoop()
```